



УДК: 624.012.35  
DOI: 10.52409/20731523\_2022\_2\_6  
EDN: ANRUKL

## Оценка остаточной несущей способности эксплуатируемых железобетонных конструкций.

Илизар Талгатович Мирсаяпов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет  
Г.Казань, Российская Федерация

**Аннотация:** При эксплуатации зданий и сооружений из железобетона с течением времени в конструкциях накапливаются дефекты и повреждения. Для правильного решения вопроса о возможности дальнейшей безопасной эксплуатации или реконструкции зданий и сооружений необходимо уметь оценивать техническое состояние железобетонных конструкций по результатам их обследования с учетом имеющихся дефектов и повреждений. Целью исследования является на основании теоретических исследований разработать уравнения остаточной оценки прочности бетона сжатой зоны и продольной растянутой арматуры изгибаемого железобетонного элемента с дефектами и повреждениями. Задачами работы являются:

- установить схему образования трещин в эксплуатируемом изгибаемом железобетонном элементе;
- разработать уравнение остаточной прочности бетона сжатой зоны и растянутой арматуры железобетонного изгибаемого элемента с учетом влияния имеющихся дефектов;
- разработать методику расчета остаточной несущей способности эксплуатируемого изгибаемого железобетонного элемента с учетом влияния имеющихся дефектов.

**Результаты.** Разработана методика оценки остаточной несущей способности (ресурса) эксплуатируемых железобетонных конструкций с учетом влияния различных дефектов и повреждений, накопленных во время эксплуатации.

**Выводы.** Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в том, что они позволяют более точно и достоверно оценивать остаточную несущую способность эксплуатируемых железобетонных конструкций с учетом накопленных за время эксплуатации дефектов и повреждений.

**Ключевые слова:** стальная арматура, конструкция напряжений, трещина, поврежденность, пластический ресурс, удельная энергия, напряжение, ползучесть бетона, упругая работа арматуры.

**Для цитирования:** Мирсаяпов Илизар Т. Оценка остаточной несущей способности эксплуатируемых железобетонных конструкций // Известия КГАСУ. 2022. № 2 (60), с. 6-14, DOI: 10.52409/20731523\_2022\_2\_6, EDN: ANRUKL

# Evaluation of the residual load-bearing capacity of operated reinforced concrete structures.

Ilizar T. Mirsayapov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering  
Kazan, Russian Federation

**Abstract:** During the operation of buildings and structures made of reinforced concrete, defects and damages heat up in the structures over time. In order to correctly resolve the issue of the possibility of further safe operation or reconstruction of buildings and structures, it is necessary to be able to assess the technical condition of reinforced concrete structures based on the results of their examination, taking into account existing defects and damages. The aim of the study is to develop, based on theoretical studies, the equations of the objective strength of the concrete of the compressed zone and the longitudinal stretched reinforcement of the bent reinforced concrete element with defects and damages. The objectives of the work are: to establish a scheme for the formation of cracks in the operated bent reinforced concrete element; to develop an equation of the objective strength of the concrete of the compressed zone and the stretched reinforcement of the reinforced concrete bent element, taking into account the influence of existing defects; to develop a methodology for calculating the residual load-bearing capacity of the operated bent reinforced concrete element, taking into account the influence of existing defects.

*Results.* A methodology has been developed for assessing the residual load-bearing capacity (resource) of operated reinforced concrete structures, taking into account the influence of various defects and damages accumulated during operation.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction industry lies in the fact that they allow for a more accurate and reliable assessment of the residual load-bearing capacity of the operated reinforced concrete structures, taking into account the accumulated defects and damages during operation.

**Keywords:** steel reinforcement, stress structure, crack, damage, plastic resource, specific energy, stress, creep of concrete, elastic work of reinforcement.

**For citation:** Ilizar T. Mirsayapov Evaluation of the residual load-bearing capacity of operated reinforced concrete structures // News KSUAE, 2022. № 2(60), p.6-14 DOI:10.52409/20731523\_2022\_2\_6, EDN: AHRUKL

## 1. Введение

Опыт эксплуатации зданий и сооружений из железобетона показывает, что с течением времени в конструкциях по различным причинам накапливаются дефекты и повреждения. Для правильного решения вопроса о возможности дальнейшей безопасной эксплуатации или реконструкции зданий и сооружений необходимо уметь оценивать техническое состояние железобетонных конструкций по результатам их обследования с учетом имеющихся дефектов и повреждений [1-5]. При этом необходимо выделить задачу прогнозирования остаточной несущей способности конструкций без внешних признаков физического износа и задачу прогнозирования остаточной несущей способности конструкций с дефектами и повреждениями. Методология прогнозирования остаточной несущей способности конструкций с дефектами и повреждениями, в принципе, не отличается от методологии прогнозирования остаточной несущей способности конструкций без видимых дефектов и повреждений. Различие состоит только в том, что в дополнение к априорной информации о материалах размерах, нагрузках следует использовать информацию о дефектах и повреждениях, полученную в результате обследования. Расчет остаточной прочности включает рассмотрение различных вариантов повреждений и дефектов с оценкой предельных нагрузок для каждого случая, а также при влиянии различных комбинаций [6-10]. Неоднородность

бетона и связанное с этим взаимодействие между повреждениями, вызванными нагрузкой и неупругой деформацией бетона могут оказать существенное влияние на продолжительную прочность бетона. Некоторые аспекты проблемы были исследованы с помощью 3D-анализа методом конечных элементов [11-12]. Бетон принимается как двухфазный композитный материал, состоящий из крупного заполнителя и матрицы жесткости. Определяющий закон для матрицы основан на теории микроплоскостей, в то время как заполнитель считается линейно упругим.

Для решения этих задач привлекаются методы механики разрушения и теории ползучести. В соответствии с механикой разрушения бетона в сжатой полосе разрушение изгибаемого железобетонного элемента по бетону сжатой зоны происходит после накопления микро- и макротрещин в определенном критическом объеме. Линейные размеры критического объема поврежденного материала определяются высотой сжатой зоны  $x(t)$  и критической длиной условной суммарной микро- и макротрещины  $l_{cr}$ , перекрывающей участок между соседними нормальными трещинами. Следовательно, разрушение изгибаемого элемента по бетону сжатой зоны происходит после достижения условной магистральной трещиной критической длины (при условии, что уровень напряжений не снижается), а не после достижения нормальными напряжениями в каком-то сечении предела прочности.

Разрушение изгибаемого элемента по растянутой арматуре происходит не обязательно по сечению с трещиной. Причиной тому является сглаживание неравномерности напряжений в арматурном стержне по длине блока между соседними трещинами при длительном действии нагрузки [13-15]. Поэтому для прогнозирования ресурса нормальных сечений железобетонных изгибаемых элементов необходимо вычисление напряжений по всей длине блока между нормальными трещинами.

Целью исследования является на основании теоретических исследований разработать уравнения объективной прочности бетона сжатой зоны и продольной растянутой арматуры изгибаемого железобетонного элемента с дефектами и повреждениями. Задачами работы являются: установить схему образования трещин в эксплуатируемом изгибаемом железобетонном элементе; разработать уравнение остаточной прочности бетона сжатой зоны и растянутой арматуры железобетонного изгибаемого элемента с учетом влияния имеющихся дефектов; разработать методику расчета остаточной несущей способности эксплуатируемого изгибаемого железобетонного элемента с учетом влияния имеющихся дефектов.

## 2. Материалы и методы

В целях упрощения расчета эффект действия длительной нагрузки условно разделяется на две стадии. Первая стадия отражает напряженное состояние конструкции при кратковременном нагружении до заданного уровня эксплуатационной нагрузки. Определение напряжений в этой стадии производится с учетом образования нормальных трещин в растянутой зоне и неравномерности деформаций по длине элемента.

При действии нагрузки железобетонный изгибаемый элемент разбивается системой поперечных трещин на блоки, которые в зоне чистого изгиба или относительно небольших перерезывающих сил имеют прямоугольную форму. Поэтому для оценки начального напряженно-деформированного состояния железобетонный изгибаемый элемент представляется в виде системы блоков, которые разделены между собой нормальными трещинами и связаны сжатой зоной бетона и растянутой арматурой. В плоском напряженном состоянии блоки можно рассматривать как прямоугольные пластинки-диски, загруженные в сечении по контакту блоков нормальными напряжениями, по нижней грани – касательными силами, представляющими собой напряжения сцепления арматуры с бетоном растянутой зоны. Для этого арматура условно отделяется от бетона, и ее действие заменяется распределенными по нижней грани касательными напряжениями сцепления (1), которые заданы на основе экспериментальных данных, либо на основе аналитического решения задачи, о распределении сил сцепления между растянутой арматурой и бетоном. В расчетах сжатая верхняя арматура не учитывается (рис. 1).

$$\tau_{xy}(x, h_0) = \tau_{xy}^{max} \cdot \sin(x + \frac{h_0}{2}) \tag{1}$$

где  $\tau_{xy}^{max}$  – максимальное касательное напряжение между арматурой и бетоном;  
 $x$  – координата рассматриваемой точки;  
 $h_0$  – рабочая высота сечения.

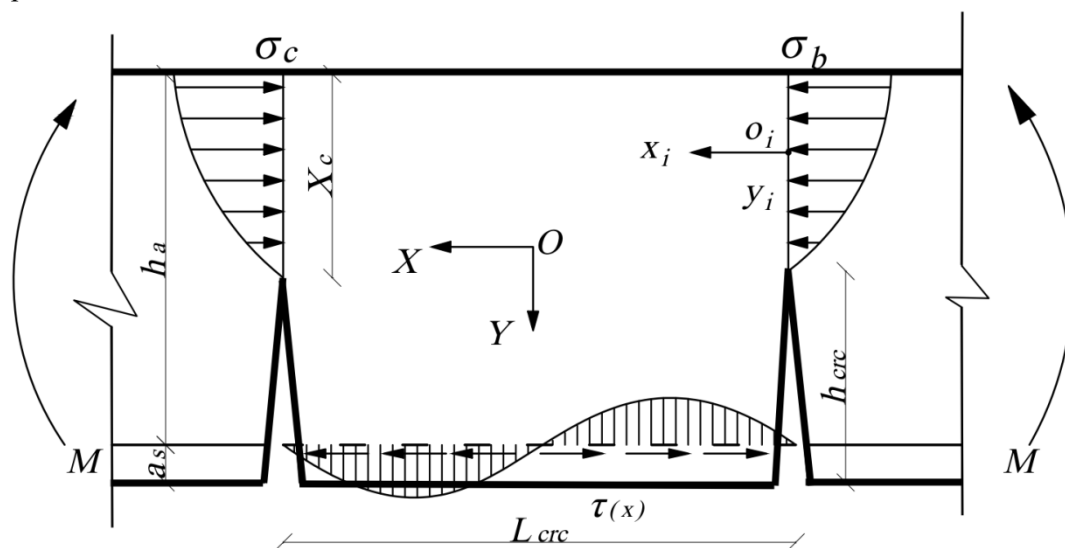


Рис.1. Схема граничных условий на контуре блока между нормальными трещинами (иллюстрация автора)

Fig. 1. Diagram of boundary conditions on the contour of the block between normal cracks (illustration by the author)

Напряжения в бетоне сжатой зоны и рабочей арматуре в сечении с трещиной определяются из условий равновесия и гипотезы плоских сечений:

- в бетоне:

$$\sigma_b(t_0) = \frac{M}{\omega \cdot b \cdot x_c (h_0 - \gamma x_c)}, \tag{2}$$

где  $M$  – изгибающий момент в рассматриваемом сечении;  
 $\omega$  – коэффициент полноты эпюры напряжений в бетоне сжатой зоны;  
 $b$  – ширина сечения балки;  
 $x_c$  – высота сжатой зоны;  
 $h_0$  – рабочая высота сечения;  
 $\gamma$  – безразмерная функция формы трещины.

- в арматуре:

$$\sigma_s(t_0) = \alpha \sigma_b(t_0) - \frac{1-\xi}{(1-\lambda)\xi}, \tag{3}$$

где  $\alpha$  – соотношение модуля упругости стали к модулю упругости бетона;  
 $\xi$  – относительная высота сжатой зоны бетона;  
 $\lambda$  – коэффициент пластичности бетона.

После определения начальных напряжений в сечениях с трещинами вычисляются начальные напряжения внутри блока между трещинами. При этом напряжения в бетоне любого рассматриваемого блока будут зависеть от нормальных напряжений по контакту блоков (по сечению с трещиной) и касательных напряжений сцепления по нижней грани:

$$\sigma_b(t_0) = \sigma_{b1}(\xi, \eta) + \sigma_{b2}(\xi, \eta, \xi_1), \tag{4}$$

где  $\sigma_{b1}(\xi, \eta)$  – нормальные напряжения в бетоне внутри блока между трещинами от действия нормальных напряжений по контакту блоков;  
 $\sigma_{b2}(\xi, \eta, \xi_1)$  – нормальные напряжения в бетоне внутри блоков между трещинами от действия касательных напряжений сцепления по нижней грани;  
 $\xi, \eta, \xi_1$  – коэффициенты, определяемые по формуле (5):

$$\xi = \frac{2x}{l_{crc}}; \eta = \frac{2y}{h_0}; \xi_1 = \frac{2x_i}{l_{crc}}, \quad (5)$$

где  $x, y$  – координаты рассматриваемых точек между трещинами;

$l_{crc}$  – расстояние между нормальными трещинами;

$h_0$  – рабочая высота сечения;

$x_i, y_i$  – координаты рассматриваемой точки в сечении с трещиной.

Нормальные напряжения в бетоне от действия нормальных напряжений по контакту блоков в зоне между трещинами вычисляются по формуле (6):

$$\sigma_{b1}(\xi, \eta) = y_0 \int_{-1}^1 L_{yy}(\xi, \eta, \xi_1) \cdot f(\xi_1) d\xi_1, \quad (6)$$

где  $L_{yy}(\xi, \eta, \xi_1)$  – функции влияния (функции Грина) для нормальных напряжений в произвольной точке блока между трещинами  $|\xi| \leq 1, |\eta| \leq 1$  от действующей на контуре  $|\xi|=1$  нагрузки;

$f(\xi_1)$  – закон изменения напряжений по сечению с трещиной.

Нормальные напряжения  $\sigma_{b2}(\xi, \eta, \xi_1)$  внутри бетонного блока от сил сцепления, представляются в виде:

$$\sigma_{b2}(\xi, \eta, \xi_1) = \left\langle -\frac{2}{\pi} \frac{\gamma_{ih}^3}{y_0} \left\{ \frac{(\xi - \xi_1)^3}{[(1-\eta)^2 + \gamma_{ih}(\xi - \xi_1)^2]^2} - \frac{(\xi + \xi_1)^3}{[(1-\eta)^2 + \gamma_{ih}(\xi + \xi_1)^2]^2} \right\} \right\rangle f(\tau), \quad (7)$$

где  $f(\tau)$  – функция распределения напряжений сцепления между бетоном и арматурой.

Напряжения в арматуре внутри зоны между трещинами вычисляются по формуле:

$$\sigma_{sm}(t_0) = \sigma_s(t_0) - \tau_s(x), \quad (8)$$

где  $\tau(x)$  – напряжения сцепления между бетоном и арматурой;

$\sigma_s(t_0)$  – напряжения в арматуре в сечении с трещиной.

Распределение напряжений сцепления по длине блока между трещинами представляется в виде:

$$\tau(x) = T \cdot f(t) \quad (9)$$

где  $T$  – максимальная величина напряжений сцепления;

$f(t)$  – функция распределения напряжений сцепления между бетоном и арматурой.

Максимальная величина напряжения сцепления  $T$  может быть поставлена в зависимость от максимального фибрового напряжения в бетоне сжатой зоны блока между трещинами  $\sigma_{b2}(\xi, \eta, \xi_1)$ :

$$T = \theta(t) \cdot \sigma_b(\xi, \eta, \xi_1) \quad (10)$$

где  $\theta(t)$  – коэффициент сцепления, представляющий собой отношение максимальной ординаты эпюры сцепления к напряжению в крайнем сжатом волокне.

После определения начальных напряжений в сечениях с трещиной, а также внутри блока между трещинами, вычисляются дополнительные напряжения.

Длительное действие нагрузки сопровождается возникновением и развитием дополнительного напряженного состояния. Если считать справедливым закон плоских сечений, то дополнительные (остаточные) напряжения в арматуре вычисляются, исходя из уравнения деформаций [2].

Функция для вычисления дополнительных напряжений в арматуре представляется в виде:

$$\sigma_s^{gon}(t) = \frac{h_0 - x}{x} E_s \int_{t_0}^t \sigma_b(t) \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{1}{E_b} + C(t, \tau) \right] dt, \quad (11)$$

где  $C(t, \tau)$  – мера ползучести бетона;

$\sigma_b(t)$  – текущие напряжения в бетоне сжатой зоны;

$h_0, x$  – то же, что и в (1).

Таким образом, как видно из (11), по мере увеличения времени нагружения в растянутой арматуре возрастают дополнительные (остаточные) напряжения пропорционально пластическим деформациям ползучести в бетоне сжатой зоны.

Остаточные растягивающие напряжения в арматуре, в свою очередь, вызывают остаточные растягивающие напряжения на верхних волокнах сжатой зоны бетона. Дополнительные растягивающие напряжения на верхних волокнах определяем, исходя из гипотезы плоских сечений и треугольной эпюры остаточных напряжений.

$$\sigma_s^{gon}(t) = \left\{ \frac{h_0 - x}{x} E_s \int_{t_0}^t \sigma_b(t) \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{1}{E_b} + C(t, \tau) \right] dt \right\} \cdot A_s \left[ \frac{1}{A_{red}} - \frac{e_0(h - x_p)}{J_{red}} \right], \quad (12)$$

где  $C(t, \tau)$ ,  $h_0$ ,  $x$  – то же, что и в (11).

Имея формулы для определения начальных (5, 8) и дополнительных (11, 12) напряжений в бетоне сжатой зоны и растянутой арматуре, можно составить выражения для определения текущих напряжений к любому моменту времени  $t$ . Текущие напряжения представляются в виде суммы начальных и дополнительных напряжений:

$$\sigma_b(t) = \sigma_b(t_0) + \sigma_b^{gon}(t), \quad (13)$$

$$\sigma_s(t) = \sigma_s(t_0) + \sigma_s^{gon}(t), \quad (14)$$

где  $\sigma_b(t)$ ,  $\sigma_s(t)$  – текущие напряжения в бетоне сжатой зоны и в растянутой арматуре соответственно;

$\sigma_b^{gon}(t)$ ,  $\sigma_s^{gon}(t)$  – дополнительные напряжения в бетоне сжатой зоны и в растянутой арматуре соответственно.

После определения текущих напряжений вычисляются остаточная (объективная) прочность бетона сжатой зоны и продольной растянутой арматуры для заданного режима нагружения:

$$R_b(t, \tau) = \frac{2}{x_c} \frac{K_{IC}(t)}{\sqrt{\pi l(t, \tau) \gamma(l)}} (l_{cr} + 4l_{sh} \tan \alpha \sin \alpha), \quad (15)$$

$$R_s(t, \tau) = \frac{\sigma_c K_{ICs}(t)}{\sqrt{[\gamma_l(l) \sigma_c]^2 l_I(t, \tau) + K_{ICs}^2(t)}}, \quad (16)$$

где  $K_{IC}(t)$  – коэффициент интенсивности напряжений в бетоне сжатой зоны;

$K_{ICs}(t)$  – коэффициент интенсивности напряжений в арматуре;

$l(t, \tau)$  – длина трещины;

$\alpha$  – угол наклона уплотненной пирамиды;

$l_I(t, \tau)$  – длина трещины в арматуре;

$l_{sh}$  – длина зоны сдвига;

$\gamma$ ,  $\xi$ ,  $\lambda$  – то же, что и в (2), (3).

Затем вычисляется остаточная несущая способность по нормальному сечению:

$$M_{ocm}(t) = \frac{R_b(t, \tau) \xi [(1 + \lambda) - 0,33 \xi (\lambda^2 + \lambda + 1)] b h_0^2}{2}, \quad (17)$$

$$M_{ocm}(t) = R_s(t, \tau) A_s h_0 \left[ 1 - \frac{0,33 \xi (\lambda^2 + \lambda + 1)}{\lambda + 1} \right], \quad (18)$$

где  $R_b(t, \tau)$  – остаточная прочность бетона сжатой зоны;

$R_s(t, \tau)$  – остаточная прочность арматуры;

$h_0$ ,  $\lambda$ ,  $\xi$  – то же, что и в (2), (3).

Рассмотрим влияние наиболее часто встречающихся дефектов на остаточную несущую способность изгибаемого элемента по нормальному сечению.

Для учета влияния состояния сцепления арматуры с бетоном на остаточную прочность нормального сечения используется решение задачи о напряженном состоянии бесконечной полосы под действием самоуравновешивающейся системы из двух единичных сосредоточенных сил, касательно приложенных по краю полосы [4]. Влияние различных вариантов нарушения сцепления арматуры с бетоном на величину напряжений в бетоне сжатой зоны, в растянутой арматуре и остаточной несущей способности учитывается корректировочными функциями  $K_i$ . При этом исходят из того, что локальное нарушение сцепления арматуры с бетоном изменяет эпюру касательных усилий и, как следствие, меняются площади зон влияния касательных напряжений

сцепления при неизменном значении общей площади эпюры касательных усилий  $0,5\tau_{cr}l_{cr}$ . Выражение для корректировочных функций влияния имеют вид [2]:

$$K_1(\tau) = K_3(\tau) = \frac{h_{1i}(0,25l_{cr}-x_{li})-m}{\tau_{cr}l_{cr}}, \quad (19)$$

$$K_2(\tau) = \frac{[(h_{1i}+H)+(h_{2i}+H_1)]m}{\tau_{cr}l_{cr}}, \quad (20)$$

$$h_{1i} = h_{2i} = \frac{H[(0,25l_{cr}-x_{li})-m]}{0,25l_{cr}-x_{li}}, \quad (21)$$

$$H = \frac{\tau_{cr}}{0,5l_{cr}-x_{li}}, \quad (22)$$

где  $x_{li}$  – длина участка нарушения сцепления арматуры с бетоном;

$A$  – величина сосредоточенной силы, приложенной в середине блока между трещинами;

$h_{1i}, h_{2i}$  – функции влияния единичных сосредоточенных сил;

$m$  – коэффициент влияния.

Если на каких-то рассматриваемых участках нет нарушения сцепления арматуры с бетоном, то при вычислении соответствующих функций влияния принимается  $x_{li}=0$ .

Напряжения в бетоне сжатой зоны внутри блока между нормальными трещинами от действия сил сцепления арматуры с бетоном, при наличии участков с нарушенным сцеплением, вычисляются по формуле:

$$\sigma_{b2}(\xi, \eta, \xi_1) = \langle \sum_1^n K_i \frac{2P_i}{\pi} \cdot \frac{\gamma_{lh}}{\gamma_0} \left\{ \frac{(\xi-\xi_1)^3}{[(1-\eta)^2+\gamma_{lh}(\xi-\xi_1)^2]^2} - \frac{(\xi+\xi_1)^3}{[(1-\eta)^2+\gamma_{lh}(\xi+\xi_1)^2]^2} \right\} \rangle, \quad (23)$$

где  $K_i$  – корректировочные функции влияния;

$\gamma_{lh}$  – коэффициенты влияния единичных касательных напряжений.

Нормальные напряжения  $\sigma_{b1}(\xi, \eta)$  вычисляются по формуле (4).

Напряжения в растянутой арматуре с учетом локальных нарушений сцепления вычисляются по формуле:

$$\sigma_s(t) = \sigma_s(t_0) - \tau_s f_\phi(\tau), \quad (24)$$

где  $f_\phi(\tau)$  – фактический закон распределения касательных напряжений сцепления.

В дальнейшем оценка остаточной несущей способности производится аналогично вышеизложенному по (15, 16, 17, 18).

Наиболее характерными дефектами в бетоне сжатой зоны могут быть горизонтальные трещины и локальные разрушения вследствие механических повреждений.

Рассмотрим влияние этих факторов на напряженно-деформированное состояние и на изменение остаточной несущей способности изгибаемых элементов по нормальному сечению.

### 3. Результаты и обсуждение

Образование горизонтальных трещин в бетоне сжатой зоны свидетельствует о начале процесса снижения несущей способности конструкции по бетону сжатой зоны.

Количественная оценка влияния дефекта на остаточную несущую способность производится в следующей последовательности:

– в зависимости от длины горизонтальной трещины вычисляется остаточная прочность бетона сжатой зоны (15);

– вычисляется остаточная несущая способность изгибаемого элемента по бетону сжатой зоны (17).

Локальные разрушения бетона сжатой зоны вследствие механических повреждений приводят к увеличению нормальных напряжений в бетоне, что в зависимости от размеров участка повреждения и уровня нагрузки уменьшают остаточную прочность бетона, и, как следствие, остаточную прочность конструкции в целом. Количественная оценка влияния этих повреждений на остаточную прочность конструкции производится в следующей последовательности:

– в зависимости от размеров локальных разрушений и их местоположения по формулам (6) и (7) вычисляются нормальные напряжения в бетоне внутри блока между трещинами от действия нормальных напряжений по контакту блоков –  $\sigma_{b1}(\xi, \eta)$  и

нормальные напряжения в бетоне внутри блока между трещинами от действия касательных напряжений сцепления по нижней грани –  $\sigma_{b2}(\xi, \eta, \xi_1)$ , а также суммарные напряжения (5);

- вычисляются напряжения в арматуре внутри блока между трещинами (8);
- в зависимости от величины  $\sigma_b(t)$  и размера локального разрушения определяется суммарная длина условных макро- и микротрещин  $l(t, \tau)$ ;
- по формуле (15) вычисляется остаточная прочность бетона;
- по формулам (17) и (18) вычисляется остаточная несущая способность железобетонного изгибаемого элемента.

Сопоставление результатов расчетов с результатами имеющихся экспериментальных методик показало, что использование данного метода позволяет экономить бетон и арматуру до 30%.

#### 4. Заключение

Выполненные теоретические исследования эксплуатируемых изгибаемых железобетонных элементов позволили разработать методику оценки остаточной несущей способности эксплуатируемых железобетонных конструкций с учетом влияния различных дефектов и повреждений и позволили установить следующие основные закономерности разрушения эксплуатируемого железобетонного элементами с дефектами и повреждениями:

1. Установлена схема образования трещин в эксплуатируемом изгибаемом железобетонном элементе. Основными дефектами и повреждениями, влияющими на остаточную несущую способность эксплуатируемых железобетонных конструкций является образование и развитие горизонтальных микро- и макротрещин в бетоне сжатой зоны и нарушение сцепления между бетоном и растянутой рабочей арматурой.

2. Разработана новая теория, описывающая развитие горизонтальных микро- и макротрещин в бетоне сжатой зоны при длительной эксплуатации железобетонных конструкций.

3. Впервые разработано уравнение остаточной прочности бетона сжатой зоны и растянутой арматуры железобетонного изгибаемого элемента с учетом влияния имеющихся дефектов.

4. Получены аналитические уравнения изменения основных силовых параметров, характеризующих сопротивление бетона сжатой зоны с дефектами и повреждениями и арматуры при нарушении сцепления с окружающим бетоном.

5. Разработана методика расчета остаточной несущей способности эксплуатируемого изгибаемого железобетонного элемента с учетом влияния имеющихся дефектов, позволяющая достоверно оценивать остаточную несущую способность эксплуатируемых железобетонных конструкций с учетом накопленных за время эксплуатации дефектов и повреждений.

#### Список литературы / References

1. Atutis E., Valivonis J., Atutis M. Deflection determination method for bfrp prestressed concrete beams under fatigue loading // Compos. Struct. 2019. № 226. P. 111182. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111182.
2. Kim G., Loreto G., Kim J.-Y., Kurtis K. E., Wall J. J., Jacobs L. J. In situ nonlinear ultrasonic technique for monitoring microcracking in concrete subjected to creep and cyclic loading // Ultrasonics. 2018. №88. P. 64–71. DOI: 10.1016/j.ultras.2018.03.006.
3. Li Q., Liu M., Lu Z., Deng X. Creep Model of High-Strength High-Performance Concrete Under Cyclic Loading // J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed. 2019. №3 (34). P. 622–629. DOI: 10.1007/s11595-019-2096-9.
4. Chen P., Zhou X., Zheng W., Wang Y., Bao B. Influence of high sustained loads and longitudinal reinforcement on long-term deformation of reinforced concrete beams // J. Build. Eng. 2020. № 30. DOI: 10.1016/j.job.2020.101241.
5. Bouziadi F., Boulekbache B., Haddi A., Hamrat M., Djelal C. Finite element modeling of creep behavior of FRP-externally strengthened reinforced concrete beams // Eng. Struct. 2020. №204. P. 109908. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109908.



6. Mirsayapov Ilshat T. Detection of stress concentration regions in cyclic loading by the heat monitoring method // *Mech. Solids*. 2010. №1(45). P.133–139. DOI: 10.3103/S0025654410010164.
7. Song L., Fan Z., Hou J. Experimental and Analytical Investigation of the Fatigue Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams // *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 2019. №1(13). DOI: 10.1186/s40069-019-0340-5.
8. Zamaliev F. S., Zakirov M. A. Stress-strain state of a steel-reinforced concrete slab under long-term // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. P. 12–23.
9. Tang H., Chen Z., Avinesh O., Guo H., Meng Z., Engler-Pinto C., Kang H. Notch Insensitivity in Fatigue Failure of Chopped Carbon Fiber Chip-Reinforced Composites Using Experimental and Computational Analysis // *Compos. Struct.* 2020. №10(16). P. 112280. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112280.
10. Choe G., Shinohara Y., Kim G., Lee S., Lee E., Nam J. Concrete corrosion cracking and transverse bar strain behavior in a reinforced concrete column under simulated marine conditions // *Appl. Sci.* 2020. №5(10). DOI:10.3390/app10051794.
11. Gambarelli S., Ožbolt J. Interaction between damage and time-dependent deformation of mortar in concrete: 3D FE study at meso-scale // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019. № 615. P. 012013. DOI:10.1088/1757-899X/615/1/012013.
12. Augéard E., Ferrier E., Michel L. Mechanical behavior of timber-concrete composite members under cyclic loading and creep // *Eng. Struct.* 2020. №210. P. 110289. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110289.
13. Trekin N. N., Kodysh E. N., Mamin A. N., Trekin D. N., Onana J. Improving methods of evaluating the crack resistance of concrete structures // *American Concrete Institute, ACI Special Publication*. 2018. № 326. P. 93.1–93.6.
14. Liang J., Nie X., Masud M., Li J., Mo Y. L. A study on the simulation method for fatigue damage behavior of reinforced concrete structures // *Eng. Struct.* 2017. № 150, P. 25–38. DOI:10.1016/j.engstruct.2017.07.001
15. Zhang G., Zhang Y., Zhou Y. Fatigue Tests of Concrete Slabs Reinforced with Stainless Steel Bars // *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2018. P. 1-5.

#### Информация об авторах.

**Илизар Талгатович Мирсаяпов**, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г.Казань, Российская Федерация

Email: mirsayapov1@mail.ru

#### Information about the authors.

**Pizar T. Mirsayapov**, Doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: mirsayapov1@mail.ru