

УДК 624.012.35

Мирсаяпов Илизар Талгатович

доктор технических наук, профессор

E-mail: mirsayapov1@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Гарифуллин Динар Рафикович

главный инженер

E-mail: fsrkazan@mail.ru

НППФ Фундаментспецремонт

Адрес организации: 420087, Россия, г. Казань, ул. Гвардейская, д. 56

Уравнения выносливости арматуры изгибаемого железобетонного элемента при режимном многократно повторяющемся нагружении

Аннотация

Постановка задачи. В железобетонных изгибаемых элементах под действием многократно повторяющейся циклической нагрузки независимо от режима нагружения в бетоне сжатой зоны проявляются и развиваются неупругие деформации виброползучести. По этой причине условия деформирования бетона сжатой зоны и продольной растянутой арматуры нестационарны независимо от режима нагружения.

Результаты. Проведены экспериментальные и теоретические исследования поведения железобетонного изгибаемого элемента при многократно повторяющемся циклическом нагружении и установленные режимы деформирования продольной арматуры в составе изгибаемого элемента. Для оценки выносливости арматуры при таких режимах деформирования проведены исследования и с использованием методов механики разрушения упругопластических материалов получены уравнения выносливости арматуры при различных режимах нагружения. На основании проведенных исследований разработаны уравнение выносливости арматуры для практических расчётов железобетонных изгибаемых элементов при режимных многократно повторяющихся нагружениях.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что предложенная методика позволяет наиболее точно оценить напряженно-деформированное состояние арматуры и процессы изменения прочности стали с позиций механики разрушения, что является существенным вкладом в теорию усталостной прочности и обеспечивает экономию стали до 20 % по сравнению с существующими методами.

Ключевые слова: железобетон, арматура, выносливость, режимное нагружение, циклическая нагрузка, изгибаемый элемент, механика разрушения.

Введение

При действии режимных циклических нагрузок происходит непрерывное изменение напряженного состояния нормального сечения. При этом, как и в случае действия стационарных циклических нагрузок, условия деформирования бетона сжатой зоны и растянутой арматуры нестационарны. В этом случае нестационарность деформирования бетона сжатой зоны и продольной растянутой арматуры вызваны как нестационарностью внешней нагрузки, так и непрерывным изменением напряжений и коэффициентов асимметрии цикла напряжений вследствие проявления деформаций виброползучести в связанных условиях. Изменение напряжённого состояния нормального сечения при многократно повторяющемся циклическом нагружении, в основном, зависит от закономерностей развития деформаций виброползучести. Поэтому нестационарность напряженного состояния нормального сечения, вызванная изменениями напряжений и коэффициентов асимметрии цикла напряжений в бетоне и арматуре, будет определяться особенностями развития деформаций в виброползучести при различных режимах нестационарного циклического нагружения [1-5].

Напряженно-деформированное состояние изгибаемого элемента

В связи с тем, что в виброползучесть бетона протекает в связанных условиях, в нормальных сечениях элемента возникает дополнительное напряженное состояние (рис. 1) [4, 6-8]. Тогда при нестационарных режимах циклического нагружения текущие напряжения в бетоне сжатой зоны и в продольной растянутой арматуре представляем в виде:

$$\sigma_b^{max}(t, \tau) = \sigma_b^{max}(t_0) \pm \sum_{i=2}^k \Delta \sigma_{bi}(t, \tau) - \sum_{i=1}^k \sigma_{bi}^{ad}(t, \tau), \quad (1)$$

$$\sigma_s^{max}(t, \tau) = \sigma_s^{max}(t_0) \pm \sum_{i=2}^k \Delta \sigma_{si}(t, \tau) - \sum_{i=1}^k \sigma_{si}^{ad}(t, \tau), \quad (2)$$

где $\sigma_b^{max}(t_0), \sigma_s^{max}(t_0)$ – начальные максимальные напряжения в бетоне сжатой зоны и растянутой арматуре в момент приложения нагрузки на первом этапе нагружения; $\sigma_{bi}^{ad}(t, \tau), \sigma_{si}^{ad}(t, \tau)$ – продольные дополнительные напряжения в бетоне сжатой зоны и растянутой арматуре вследствие проявления виброползучести бетона; $\Delta \sigma_{bi}(t, \tau), \Delta \sigma_{si}(t, \tau)$ – приращение начальных напряжений в бетоне и арматуре при переходе от одного блока к другому.

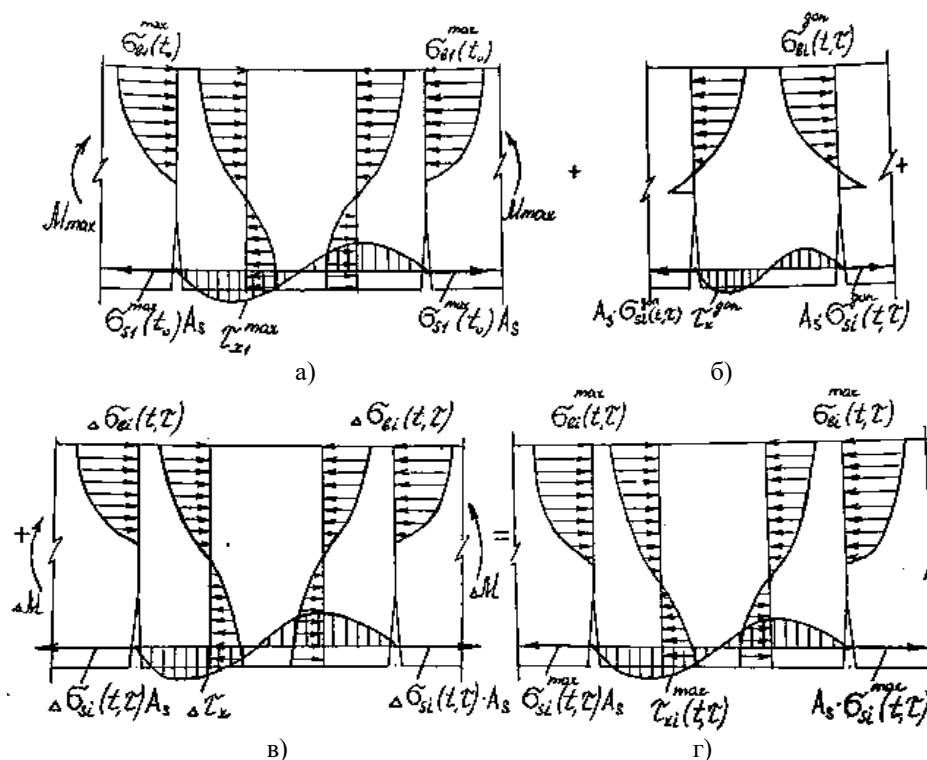


Рис. 1. Напряженное состояние нормального сечения при действии многократно повторяющихся циклических нагрузок нестационарного режима (иллюстрация авторов): а) начальное напряженное состояние; б) дополнительное напряженное состояние вследствие проявления деформаций виброползучести; в) дополнительное напряженное состояние, возникающее при переходе от одного блока к другому; г) текущее (суммарное) напряженное состояние

Оценка выносливости растянутой арматуры при повышающемся режиме циклического нагружения

При повышающемся режиме циклической нагрузки напряжения и коэффициенты асимметрии цикла напряжения меняются по сложному закону. При этом происходит непрерывное увеличение напряжения как от блока к блоку, так и в пределах каждого блока. Схема изменения напряжений в растянутой арматуре изгибаемого элемента представлены на рис. 2.

Уравнение остаточной прочности стальной арматуры в составе железобетонного изгибаемого элемента при повышающемся режиме внешней нестационарной циклической нагрузки представляется в виде:

$$R'_s(t, \tau) = \frac{\sigma_c \cdot k_{cf}}{\sqrt{(Y\sigma_c)^2 \cdot l(t, \tau) + k_{cf}^2}}. \quad (3)$$

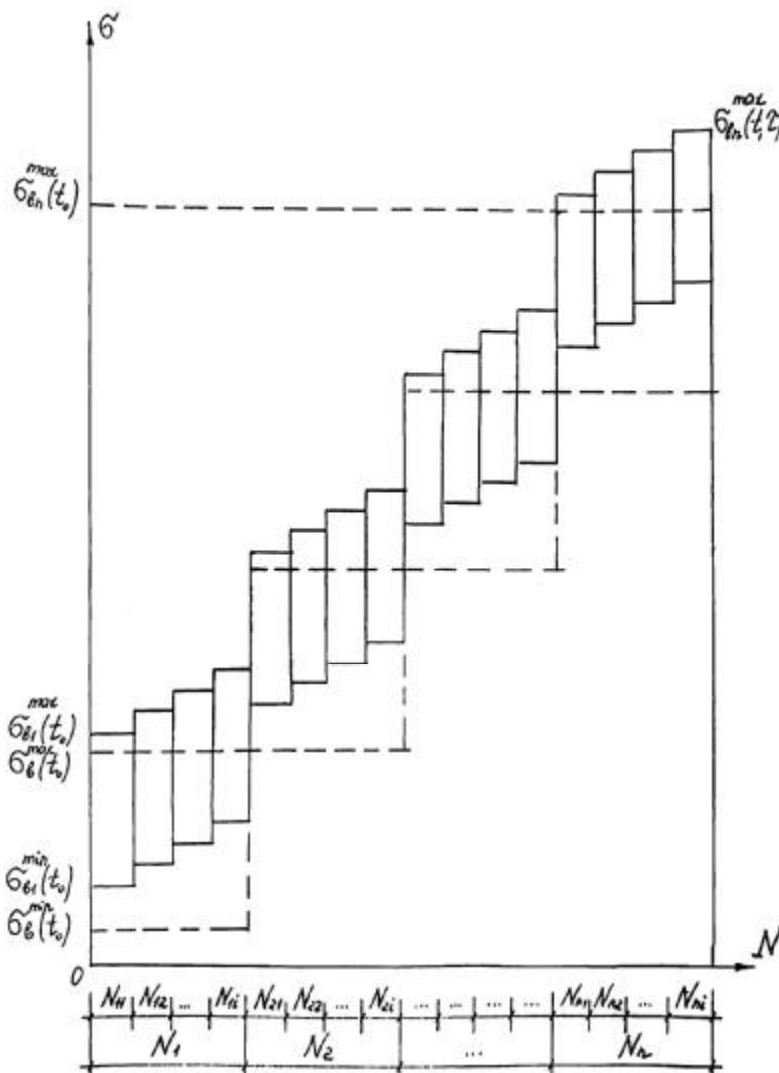


Рис. 2. Схема изменений напряжений в растянутой арматуре изгибаемого элемента при многократно повторяющемся нагружении (иллюстрация авторов)

Для принятой схемы нагружения растянутой арматуры в составе изгибаемого железобетонного элемента объективная прочность зависит от циклической вязкости разрушения $k_{cf}(t, \tau)$, суммарной длины макротрещин, перепада напряжения в переходе от одного к другому и вычисляется по формуле (3).

Оценка выносливости растянутой арматуры при понижающемся режиме циклического нагружения

При понижающихся режимах циклической нагрузки напряжения и коэффициенты асимметрии цикла напряжений меняются по сложному закону. При этом в пределах каждого блока происходит непрерывное увеличение $\sigma_{si}^{max}(t)$ и ρ_{sti-1} , а при переходе от одного блока к другому происходит уменьшение максимального значения напряжений цикла. Схема изменения напряжений в растянутой арматуре изгибаемого элемента при понижающихся режимах внешней нагрузки представлена на рис. 3.

Для всех блоков нагружения, на которые разбивается период работы арматуры в составе железобетонного элемента, суммарная длина макротрещин вычисляется по формуле:

$$l(t, \tau) = l(t_1, \tau) + \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^k \Delta l_{crni}(t, \tau), \quad (4)$$

где n – количество блоков нагружения изгибаемого элемента; k – количество этапов нагружения (за минусом этапов, при которых наблюдается инкубационная стадия, и трещина считается еще микротрещиной); $l(t_1, \tau)$ – начальная длина макротрещины; $\Delta l_{crni}(t, \tau)$ – приращение длины макротрещины на i -том этапе нагружения n -ого блока.

При многоцикловом нагружении, независимо от режима, напряжения в продольной растянутой арматуре меньше предела текучести (физического или условного). Поэтому при расчетах используются только участок упругой работы материала.

Тогда напряжение в арматуре на любой стадии нагружения будут равны:

$$\sigma_{si}(t, t_0) = \varepsilon_{si}(t, t_0) E_s. \quad (5)$$

Необходимо добавить, что на всех стадиях нагружения деформации в арматуре не должны превышать предельных деформаций при заданном режиме и количестве циклов нагружения то есть:

$$\varepsilon_{si}^{max}(t, t_0) = \frac{\sigma_{si}^{max}(t, t_0)}{E_s} \leq \varepsilon_{si,rep} = \frac{R_{si,rep}}{E_s}. \quad (6)$$

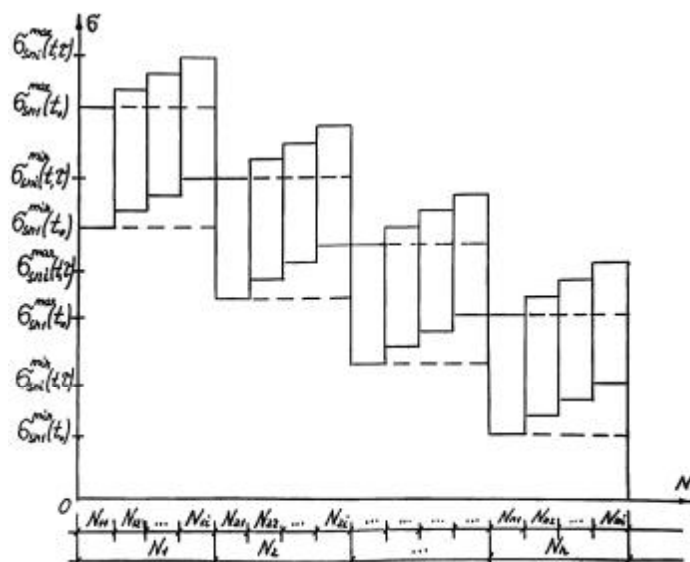


Рис. 3. Схема изменения напряжений в растянутой арматуре N изгибаемого элемента при понимающемся режиме внешней циклической нагрузки с $M^{max} \neq const$, $\rho_M \neq const$ (иллюстрация авторов)

Накопленные результаты экспериментальных и теоретических исследований показывают, что изменение прочности арматуры при циклическом нагружении в полулогарифмических координатах $R_{si,rep} - \lg N$ описывается линейной зависимостью. Для аналитического описания этой зависимости прежде всего необходимо правильно определить начало и конец графика выносливости [4, 9, 10, 11].

Уравнения выносливости арматуры

Начало графика выносливости соответствует прочностю арматуры при однократном нагружении со скоростью, равной скорости приложения циклической нагрузки. При этом необходимо отметить, что чем выше частота приложения циклической нагрузки, тем больше прочностю однократном нагружении и предел выносливости. Это объясняется эффектом «запаздывание» пластических деформаций при циклическом нагружении.

Для практических расчетов за начало графика выносливости арматуры принимаем точку:

$$R_{s,rep}(t_0) = K_{gs} \sigma_u. \quad (7)$$

Конечная точка графика выносливости соответствует пределу выносливости арматуры на базе $2 \cdot 10^6$ циклов. Предел выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов нагружения вычисляется по (5).

Тогда в практических расчетах предел выносливости арматуры вычисляем по формуле:

$$R_{si,rep} = K_{gs}\sigma_u - \frac{\lg N_i}{\lg(2 \cdot 10^6)} (K_{gs}\sigma_u - R_{sp,rep}). \quad (8)$$

Аналитические зависимости для описания прочности арматуры при режимном циклическом нагружении получают путем трансформирования зависимости (8). При вычислении значений усталостной прочности в случае режимных нагружений необходимо учитывать влияние уровня поврежденности в предыдущем блоке на усталостную прочность при последующем нагружении после смены режима.

В пределах начального блока, независимо от последовательности блоков нагружения, изменение усталостной прочности описывается уравнением (8). В каждом последующем блоке происходит дальнейшее изменение прочности, но исходной прочностью для каждого из них является усталостная прочность в конце предыдущего блока. Прочность арматуры в начале каждого последующего блока зависит от уровня напряжения в предыдущих блоках и последовательности чередования блоков с разными уровнями напряжений.

Рассмотрим последовательно повышающийся режим блочного нестационарного нагружения. Если в пределах рассматриваемого блока $\sigma_{si}^{max}(t, t_0) < R_{sp,rep}$, то снижение прочности не происходит.

В тех случаях, когда $\sigma_{si}^{max}(t, t_0) > R_{sp,rep}$, необходимо учитывать накопление усталостных повреждений в пределах каждого блока и влияние этих повреждений на изменение выносливости в последующих блоках.

Выносливость арматуры в пределах первого блока вычисляется по формуле (8), а в последующих блоках:

$$R_{si,rep} = R_{si-1,rep} - \frac{\lg N_i}{\lg(2 \cdot 10^6)} (R_{si-1,rep} - \frac{R_{sp,rep}}{\Delta K_s}), \quad (9)$$

где

$$\Delta K_s = \frac{R_{sp,rep}}{R_{sp,rep} - \frac{\lg N_{2i}}{\lg N_{3i}} (R_{si-1,rep} - R_{sp,rep})},$$

N_{2i} – долговечность арматуры в циклах при заданных параметрах циклического нагружения без учета накопленных на предыдущем этапе повреждений;

N_{3i} – то же, с учетом накопленных на предыдущем этапе повреждений;

$R_{si-1,rep}$ – выносливость арматуры в конце предыдущего блока;

$R_{sp,rep}$ – предел выносливости арматуры на базе $2 \cdot 10^6$ циклов;

N_i – количество циклов нагружения в рассматриваемом блоке.

Долговечность арматуры при заданных параметрах циклического нагружения без учета накопленных на предыдущем этапе повреждений в случаях, когда $\sigma_{si}^{max}(t, t_0) > R_{sp,rep}$ определяется, исходя из графика выносливости по формуле:

$$\lg N_{2i} = \frac{\eta\sigma_u - \sigma_{si}^{max}(t, t_0)}{\eta\sigma_u - R_{sp,rep}} \lg(2 \cdot 10^6). \quad (10)$$

Из (6), с учетом $\lg(2 \cdot 10^6) = 6,33$, определяется:

$$N_{2i} = 10^{6,33} \left[\frac{\eta\sigma_u - \sigma_{si}^{max}(t, t_0)}{\eta\sigma_u - R_{sp,rep}} \right]. \quad (11)$$

Для определения долговечности арматуры при заданных параметрах циклического нагружения, с учётом накопленных на предыдущем этапе повреждений, прежде всего, устанавливаем упрощённую формулу вычисления длины усталостной трещины.

Исходя из уравнения объективной прочности арматуры (5) при помощи численного эксперимента установлено, что критическая длина усталостной трещины при разрушении составляет примерно $0,6r_s$ (где r_s – радиус арматуры). Обработкой результатов численного эксперимента устанавливаем зависимость длины трещины от количества циклов нагружения для конкретного режима циклического нагружения:

$$\lg(K(N_i - N_T)) = l(t, t_0), \quad (12)$$

где $l(t, t_0)$ – длина усталостной трещины в рассматриваемый момент времени;

N_i – количество циклов нагружения в рассматриваемый момент времени;

N_T – инкубационный период (время зарождения макротрещины) в циклах;

K – функция, учитывающая режим циклического нагружения.

Для определения этой функции составляем уравнение к моменту усталостного разрушения арматуры:

$$\lg[K(N_{2i} - N_T)] = l_{cr}. \quad (13)$$

С учётом (7) и $N_T = N_{2i}B$, уравнение (13) перепишем в виде:

$$\lg \left[K \left(10^{6,33 \frac{\eta\sigma_u - \sigma_{si}^{msx}(t, t_0)}{\eta\sigma_u - R_{sp.rep}}} - N_T \right) \right] = 0,6r_s. \quad (14)$$

Преобразуя уравнение (14), приводим к виду:

$$10^{l_{cr}} = K \left[10^{6,33 \frac{\eta\sigma_u - \sigma_{si}^{msx}(t, t_0)}{\eta\sigma_u - R_{sp.rep}}} - B \cdot 10^{6,33 \frac{\eta\sigma_u - \sigma_{si}^{msx}(t, t_0)}{\eta\sigma_u - R_{sp.rep}}} \right],$$

откуда

$$K = \frac{1}{1 - B} \cdot 10^{l_{cr} - 6,33 \frac{\eta\sigma_u - \sigma_{si}^{msx}(t, t_0)}{\eta\sigma_u - R_{sp.rep}}}. \quad (15)$$

Долговечность арматуры с учётом накопленных на предыдущем этапе повреждений определяется, исходя из уравнения (12) подстановкой вместо $N_i - N_{3i}$ и заменой $l(t, t_0)$ на $l_{cr} - l_{i-1}(t, t_0)$ (где $l_{i-1}(t, t_0)$ – длина трещины в конце предыдущего блока).

$$\lg(K(N_{3i} - N_T)) = l_{cr} - l_{i-1}(t, t_0). \quad (16)$$

После ряда преобразований из уравнения (16) определяем N_{3i} :

$$N_{3i} = \frac{10^{l_{cr} - l_{i-1}(t, t_0)}}{k} - kN_T. \quad (17)$$

В случае последовательного понижения режима блочного нестационарного нагружения необходимо учитывать циклы нагружения, в течение которых, после перехода к блокам с меньшим уровнем нагрузки, не происходит снижение прочности.

Количество циклов нагружения, в течение которых не происходит снижение усталостной прочности, зависит от уровня напряжения в предыдущем блоке и скорости развития трещин в рассматриваемом блоке нагружения:

$$N_D = \frac{\Delta l_{II}}{V(l)}, \quad (18)$$

$$\Delta l_{II} = 2 \left(\frac{\Delta K_{i-1}}{\sigma_{pre}} \right)^2 \frac{1}{\pi Y(l)},$$

$$\Delta K_{i-1} = K_{ii-1}^{max} (1 - \rho_{si-1}),$$

$$K_{ii-1}^{max} = \sigma_{si-1}^{max}(t, t_0) \sqrt{l_{i-1}(t, t_0) Y(l)},$$

где Δl_{II} – зона влияния предыдущего блока нагружения;

ΔK_{i-1} – коэффициент интенсивности напряжений в вершине усталостной трещины;

$Y(l)$ – функция, учитывающая вид трещины и схему нагружения, в практических расчетах может быть принята равной 1,2;

$V(l)$ – скорость развития микротрещин в рассматриваемом блоке нагружения.

Тогда предел выносливости арматуры в конце рассматриваемого блока нагружения:

$$R_{si,rep} = R_{si-1,rep} - \frac{\lg(N_i - N_D)}{\lg(2 \cdot 10^6)} R_{si-1,rep} - R_{sp, \frac{rep}{\Delta K_s}}. \quad (19)$$

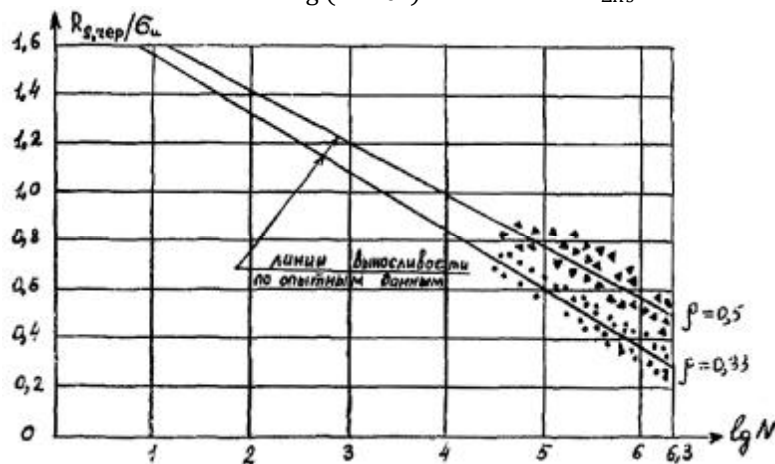


Рис. 4. Графики выносливости арматуры (иллюстрация авторов)

Сопоставление теоретических и экспериментальных значений выносливости представлены на рис. 4.

Заключение

1. Проведенные исследования позволили установить, что условия для формирования продольной растянутой арматуры в составе изгибаемого железобетонного элемента нестационарные независимо от режима нагружения.

2. Разработаны уравнения выносливости продольной растянутой арматуры железобетонного изгибаемого элемента при режимных многократно повторяющихся циклических нагружениях с использованием теории виброползучести бетона и механики разрушения упругопластических материалов. Полученное уравнение адекватно и достаточно оценивает выносливость арматуры при повышающихся и понижающихся режимах нагружения и позволяет получить надёжные и одновременно экономичные проектные решения.

Список библиографических ссылок

1. Bareley L., Kowalsky M. Critical bending strain of reinforcing steel and the buckled bar tension test // *ACI Materials Journal*. 2019. № 3 (116). P. 53–61.
2. 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 // *Engineering Structures*. 2017. № 150. P. 25–38.
3. Luo X., Tan Z., Chen Y. F., Wang Y. Comparative study on fatigue behavior between unbonded prestressed and ordinary reinforced reactive powder concrete beams // *Materialprüfung. Materials Testing*. 2019. № 4 (61). P. 323–328.
4. Mirsayapov Ilshat T. Detection of stress concentration regions in cyclic loading by the heat monitoring method // *Mechanics of Solids*. 2010. № 1 (45). P. 133–139.
5. Song L., Fan Z., Hou J. Experimental and Analytical Investigation of the Fatigue Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2019. № 1 (13).
6. Zhang G., Zhang Y., Zhou Y. Fatigue Tests of Concrete Slabs Reinforced with Stainless Steel Bars // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. № 1.
7. Мирсаяпов Ильшат Т. Усталостное сопротивление изгибаемых элементов действию поперечных сил при средних пролетах среза // *Бетон и железобетон*. 2006. № 3. С. 23–25.
8. Мирсаяпов Ильшат Т., Тамразян А. Г. К разработке научных основ теории выносливости железобетонных конструкций // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 1. С. 50–56.
9. Mirsayapov Ilshat T. A study of stress concentration zones under cyclic loading by thermal imaging method // *Strength of Materials*. 2009. № 3 (41). P. 339–344.
10. 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.
11. Zhang C., Duan P., Zheng B., Li M. Numerical analysis of diaphragm fatigue of reinforced concrete simply supported T-beams // *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2018. № 5 (11). P. 193–201.

Mirsayapov Ilizar Talgatovich

doctor of technical sciences, professor

E-mail: mirsayapov1@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Garifullin Dinar Rafikovich

engineer

E-mail: fsrkazan@mail.ru

NPPF Fundamentspetsremont

The organization address: 420087, Russia, Kazan, Gvardeyskaya st, 56

Equations of the endurance of the reinforcement of a bending reinforced concrete element under regime repeated loading

Abstract

Problem statement. In reinforced concrete bending elements under the action of repeated cyclic loading, regardless of the loading regime, inelastic creep deformations appear and develop in the concrete of the compressed zone. For this reason, the concrete deformation conditions of the compressed zone and the longitudinal stretched reinforcement are non-stationary regardless of the loading mode.

Results. Experimental and theoretical studies of the behavior of a reinforced concrete bending element under repeated cyclic loading and the established modes of deformation of the longitudinal reinforcement as part of the bending element are carried out. To assess the endurance of the reinforcement under such deformation regimes, studies have been conducted and equations of reinforcement endurance under different loading modes have been obtained using the methods of fracture mechanics of elastic-plastic materials. Based on the conducted research, an equation of rebar endurance was developed for practical calculations of reinforced concrete bending elements under regime repeated loads.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry is that the proposed method allows the most accurate assessment of the stress-strain state of the reinforcement and the processes of changing the strength of steel from the standpoint of fracture mechanics, which is a significant contribution to the theory of fatigue strength and provides steel savings of up to 20 % compared to existing methods.

Keywords: reinforced concrete, reinforcement, endurance, regime loading, cyclic loading, bending element, fracture mechanics.

References

1. Bareley L., Kowalsky M. Critical bending strain of reinforcing steel and the buckled bar tension test // *ACI Materials Journal*. 2019. № 3 (116). P. 53–61.
2. 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 // *Engineering Structures*. 2017. № 150. P. 25–38.
3. Luo X., Tan Z., Chen Y. F., Wang Y. Comparative study on fatigue behavior between unbonded prestressed and ordinary reinforced reactive powder concrete beams // *Materialpruefung. Materials Testing*. 2019. № 4 (61). P. 323–328.
4. Mirsayapov Ilshat T. Detection of stress concentration regions in cyclic loading by the heat monitoring method // *Mechanics of Solids*. 2010. № 1 (45). P. 133–139.
5. Song L., Fan Z., Hou J. Experimental and Analytical Investigation of the Fatigue Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2019. № 1 (13).
6. Zhang G., Zhang Y., Zhou Y. Fatigue Tests of Concrete Slabs Reinforced with Stainless Steel Bars // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. № 1.
7. Mirsayapov Ilshat T. Fatigue resistance of bending elements to the action of transverse forces at average cross-section spans // *Beton i jelezobeton*. 2006. № 3. P. 23–25.
8. Mirsayapov Ilshat T., Tamrazyan A.G. On develop the scientific basis of the theory of endurance of reinforced concrete structures // *Promishlennoye i grajdanskoye stroitelstvo*. 2017. № 1. P. 50–56.
9. Mirsayapov Ilshat T. A study of stress concentration zones under cyclic loading by thermal imaging method // *Strength of Materials*. 2009. № 3 (41). P. 339–344.
10. 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.
11. Zhang C., Duan P., Zheng B., Li M. Numerical analysis of diaphragm fatigue of reinforced concrete simply supported T-beams // *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2018. № 5 (11). P. 193–201.