

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: fszrkazan@mail.ru

НППФ Фундаментспецремонт

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

Напряженно-деформированное состояние нормальных сечений железобетонных элементов при циклическом неупругом деформировании арматуры

Аннотация

Постановка задачи. Цель исследования – выявить особенности напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций в условиях малоциклового нагружения при неупругом деформировании продольной рабочей арматуры.

Результаты. В ходе исследования выявлено, что развитие неупругих деформаций в продольной растянутой арматуре вносит существенные изменения в напряженно-деформированное состояние нормального сечения изгибаемого железобетонного элемента при малоцикловом нагружении по сравнению со случаем упругого деформирования арматуры. При этом происходит неравномерное развитие деформаций арматуры, обусловленное наличием трещин в бетоне растянутой зоны, а также появляются вторичные трещины, которые начинаются в истоке нормальных трещин и развиваются в направлениях параллельных или слабонаклонных к сжатой грани элементов. Основные результаты исследования состоят в выполнении аналитических исследований влияния вышеуказанных факторов на напряженно-деформированное состояние нормальных сечений железобетонного элемента в зоне сжатого изгиба. На основании результатов исследования разработаны уравнения механического состояния бетона сжатой зоны и растянутой продольной зоны арматуры при неупругом деформировании арматуры.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли и теории железобетона заключается в том, что напряженно-деформированное состояние нормальных сечений в зоне чистого изгиба при циклическом нагружении, установленное на основании теоретических исследований, позволяет, наиболее точно оценить механическое свойство бетона сжатой зоны и продольной рабочей арматуры в условиях неупругого циклического деформирования. Это является существенным вкладом в теорию усталостной прочности и обеспечивает экономию бетона и стальной арматуры до 20 % по сравнению с аналогичными методами расчета.

Ключевые слова: малоцикловая выносливость, железобетон, арматура, неупругие деформации предел текучести, нормальные сечения, трещины, нормальные напряжения, бетон сжатой зоны, коэффициент асимметрии цикла.

Для цитирования: Мирсаяпов Илизар Т., Гарифуллин Д. Р. Напряженно-деформированное состояние нормальных сечений железобетонных элементов при циклическом неупругом деформировании арматуры // Известия КГАСУ. 2020. № 4 (54). С. 44–53.

1. Введение

В процессе эксплуатации железобетонные конструкции промышленных и энергетических зданий и сооружений подвергаются воздействию малоцикловых нагружений, когда количество циклов нагружений не превышает 50-100 [1-5]. Поэтому эти конструкции должны рассчитываться в области ограниченной усталости, что позволяет существенно повысить уровень эксплуатационных нагрузок [6-11]. В настоящее время железобетонные конструкции, испытывающие малоцикловое

нагружение рассчитываются по методике расчета, разработанной для случая многоциклового нагружения, при котором количество циклов нагружения равняется 2×10^6 [12-16]. Как правило, принимается, что бетон и арматура деформируются в упругой стадии, но такой подход не соответствует реальному характеру неупругой работы таких конструкций и не позволяет в должной степени учитывать особенности деформирования железобетонных конструкций при малоцикловом нагружении. И, как следствие, препятствует надежности и экономичности таких конструкций [17-21]. В связи с этим возникает необходимость исследования особенностей деформирования железобетонных конструкций при малоцикловом нагружении в условиях неупругого деформирования арматуры.

Целью исследования является разработка расчетной модели деформирования нормального сечения железобетонного изгибаемого элемента при неупругой работе арматуры в условиях циклического нагружения.

Задачи исследования:

- установка основных закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния нормальных сечений железобетонных изгибаемых элементов при неупругом деформировании арматуры в условиях циклического нагружения;
- разработка аналитических уравнений, описывающих изменение напряжений и деформаций в бетоне сжатой зоны;
- разработка аналитических уравнений, описывающих изменение напряжений арматуры железобетонного изгибаемого элемента.

2. Материалы и методы

Деформированные арматуры при напряжениях выше предела текучести σ_f приводят к существенным изменениям напряженно-деформированного состояния железобетонного изгибаемого элемента в процессе малоциклового нагружения. Пластическое или упругопластическое деформирование продольной рабочей арматуры железобетонного изгибаемого элемента в условиях малоциклового нагружения приводит к некоторым особенностям, одной из которых является неодинаковое деформирование в сечениях с трещинами и сечениях между трещинами по длине растянутой зоны изгибаемого элемента. На основании результатов исследований, проведенных под руководством А.А. Гвоздева, неравномерное деформирование арматуры в условиях, когда напряжение выше предела текучести, стали оценивается коэффициентом: $\Psi_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{sm}}{\varepsilon_s}$, где ε_{sm} – относительные деформации арматуры в сечениях между трещинами; ε_s – относительные деформации арматуры в сечениях с трещинами.

Неупругое деформирование арматуры происходит на пластических и на упругопластических стадиях. В тех случаях, когда напряжения в сечениях с трещинами в растянутой арматуре достигают предела текучести, начинается интенсивное развитие пластических деформаций по мере увеличения количества циклов нагружения. А в сечениях между нормальными трещинами, арматура деформируется в упругой стадии и происходит менее интенсивное развитие деформаций, а поэтому Ψ_ε уменьшается, при увеличении количества циклов нагружения. Этот процесс будет продолжаться, пока арматура деформируется в пластической стадии. В упругопластической стадии работы арматуры напряжения в сечениях с трещинами увеличиваются и, как следствие, начинается процесс перераспределения усилий между сечениями с трещинами и сечениями без трещин, поэтому развитие деформаций в сечениях с трещинами замедляется, а в сечениях между трещинами – увеличиваться что, приводит к увеличению коэффициента неравномерности деформации по длине Ψ_ε .

При неупругом деформировании арматуры в условиях малоциклового нагружения возникает самоуравновешенное дополнительное напряженное состояние, приводящее к образованию и развитию вторичных трещин, которые образуются в истоке нормальных трещин, и получают развитие в направлениях параллельных и наклонных (с небольшим углом) к нейтральной оси изгибаемого элемента. Причиной возникновения самоуравновешенного дополнительного напряженного состояния в виде поперечных напряжений σ_y и касательных напряжений τ_{xy} (рис. 1) и появления системы вторичных трещин является неравномерное распределение напряжений и деформации в сечениях с трещинами и без трещин.

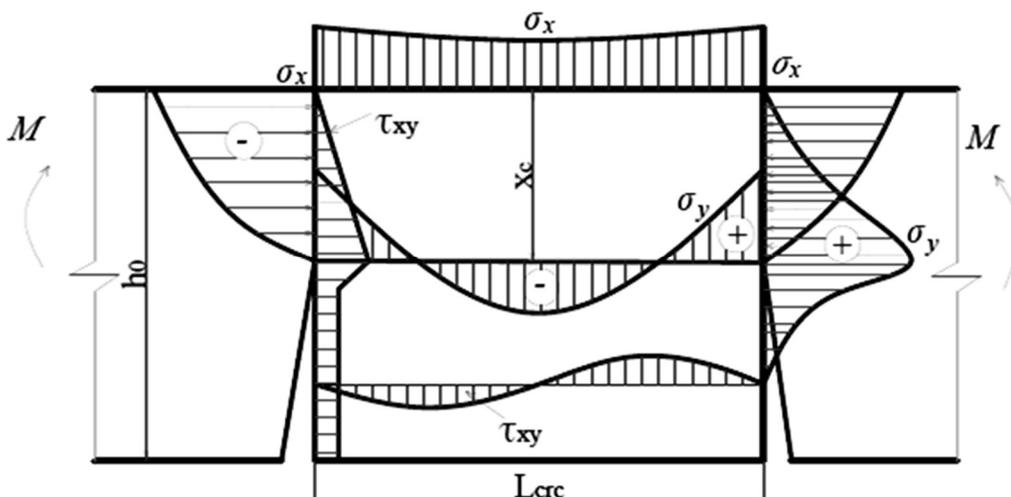


Рис. 1. Напряженное состояние железобетонных балок в блоке между нормальными трещинами (иллюстрация авторов)

Рассмотрим закономерности развития дополнительных напряжений σ_y на участке между вершинами нормальных трещин. В зоне вершины нормальной трещины возникают растягивающие напряжения σ_y , которые в определенный момент времени превышают прочность бетона на растяжение R_{Bt} .

При удалении от вершины трещины дополнительные напряжения σ_y становятся сжимающими на участке (ВО) (рис. 2) и, в дальнейшем, такая закономерность повторяется. Пластическое деформирование арматурной стали приводит к увеличению высоты и ширины раскрытия нормальных трещин при постоянной величине максимального изгибаемого момента цикла нагружения. Вследствие этого нормальная трещина развивается до границы сжимаемой зоны, затем ее приращение по высоте останавливается. При увеличении высоты и раскрытия трещины различие между законами распределения нормальных напряжений в сечениях с трещиной и между трещинами становится значительно больше и, следовательно, увеличиваются σ_y и τ_{xy} . На рис. 2. показана картина напряженного состояния в вершине нормальной трещины при неупругом деформировании рабочей растянутой арматуры. В этой зоне возникают суммарное растягивающее усилие и дополнительное напряжение σ_y , которые имеют значительные величины и их равнодействующую приложения в точке E под углом к нейтральной оси изгибаемого элемента. Поэтому происходит загиб и развитие нормальной трещины по наклонной или горизонтальной траектории, в зависимости от соотношения величин растягивающих напряжений σ_p и σ_y .

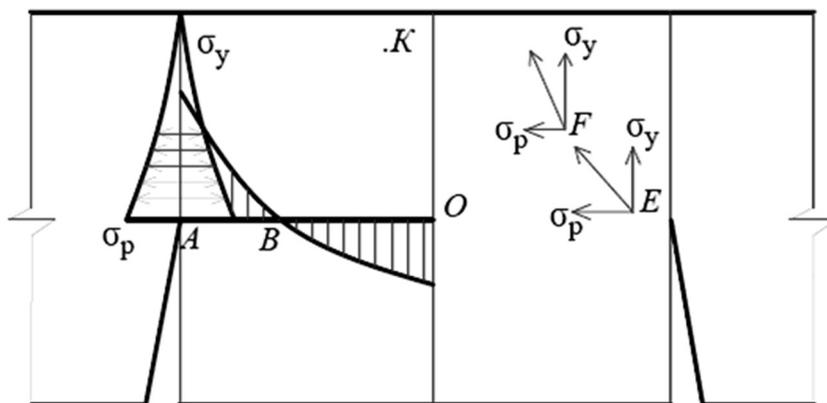


Рис. 2. Схема действующих напряжений в различных токах блока (иллюстрация авторов)

В процессе развития трещин дополнительное напряжение σ_y уменьшается (рис. 2) и в некоторой точке K равняется нулю. И, как следствие, развитие горизонтальной трещины прекращается в дальнейшем в дополнительные напряжения σ_y и τ_{xy} не оказывают влияние на несущую способность изгибаемого элемента при малоцикловом нагружении.

3. Результаты

Упругопластическое деформирование продольной растянутой арматуры изгибаемого элемента в условиях малоциклового нагружения приводит к изменению напряженно-деформированного состояния нормальных сечений. Образование и развитие неупругих деформаций в растянутой арматуре приводят к возникновению и к накоплению пластических деформаций и, как следствие, к увеличению суммарных деформаций арматуры при малоцикловом нагружении, что также вызывает интенсивное приращение прогибов. По этой причине происходит нарастание суммарных деформаций в бетоне сжатой зоны за счет развития деформаций виброползучести бетона и за счет неупругой части прогиба, возникающего в условиях пластического деформирования арматуры.

В этом случае полные деформации бетона сжатой зоны определяются по формуле:

$$\varepsilon_b(t_1) = \varepsilon_b(t_0) + \varepsilon_{pl}^{su\delta}(t_1) + \varepsilon_{pl}^{don}(t_1), \quad (1)$$

где $\varepsilon_b(t_0)$ – деформации бетона сжатой зоны при первом нагружении до максимальной нагрузки цикла; $\varepsilon_{pl}^{su\delta}(t_1)$ – деформации виброползучести бетона сжатой зоны при малоцикловом нагружении; $\varepsilon_{pl}^{don}(t_1)$ – дополнительные деформации бетона сжатой зоны.

Суммарные напряжения в бетоне сжатой зоны, при таких значениях деформаций вычисляются по диаграмме деформирования бетона, принятой ФИП-ЕКБ:

$$\sigma_b^{max}(t) = R_b(t) \frac{k \frac{\varepsilon_b(t)}{\varepsilon_{bR}} - \left(\frac{\varepsilon_b(t)}{\varepsilon_{bR}} \right)^2}{1 + (k - 2) \left[\frac{\varepsilon_b(t)}{\varepsilon_{bR}} \right]}. \quad (2)$$

Из (2) видно, что при неупругом деформировании арматуры при малоцикловом нагружении стационарного режима, увеличение напряжений в бетоне сжатой зоны происходит пропорционально изменению общих деформаций.

Максимальные напряжения в растянутой арматуре в условиях пластического деформирования ограничиваются динамическим пределом текучести стали, определяемым по скорости деформирования при малоцикловом нагружении, т.е.

$$\sigma_s^{max}(t_1, t_0) = \sigma_{sy}^{\delta}, \quad (3)$$

где σ_{sy}^{δ} – динамический предел текучести арматуры.

Упругопластическое деформирование арматуры изменяет закономерности развития деформаций и, как следствие, напряжений в бетоне сжатой зоны. В этом случае суммарные деформации бетона сжатой зоны предоставляются в виде:

$$\varepsilon_b(t) = \varepsilon_b(t_1) + \varepsilon_{pl}^{su\delta}(t_2) + \varepsilon_{pl}^{don}(t_2), \quad (4)$$

где $\varepsilon_b(t_1)$ – деформации бетона сжатой зоны, соответствующие деформациям арматуры в конце площадки текучести; $\varepsilon_{pl}^{su\delta}(t_2)$ – деформации виброползучести бетона сжатой зоны; $\varepsilon_{pl}^{don}(t_2)$ – дополнительные деформации в бетоне сжатой зоны.

При завершении пластической стадии работы, изгибаемый элемент начинает колебаться относительно нового положения нейтральной оси, соответствующего значения вертикальных перемещений элемента при величинах относительных деформаций на границе площадки текучести. На упругопластической стадии работы растянутой арматуры напряжения в бетоне зоны увеличиваются аналогично упругой стадии. В результате неупругого остаточного деформирования при малоцикловом нагружении на стадиях уменьшения нагрузки, сжатые фибры бетона нормального сечения не могут вернуться к первому начальному состоянию, возникающему при деформациях арматуры на границе площадки текучести, и препятствуют возвращению растянутой арматуры в исходное состояние. В связи с тем, что арматура деформируется в упругопластической стадии, остаточные напряжения от упругой части деформаций стремятся вернуть ее в первоначальное состояние и создают эффект обжатия нормального сечения с растяжением верхних волокон.

Дополнительные остаточные напряжения в арматуре в этом случае представляются в виде:

$$\sigma_s^{\partial on}(t_2) = \frac{h_0 - x}{x} \varepsilon_{pl}^{ocm}(t_2) \cdot E_s'(t), \quad (5)$$

где $\varepsilon_{pl}^{ocm}(t_2)$ – остаточные неупругие деформации бетона, соответствующие этой стадии; $E_s'(t)$ – модуль упругопластичности арматурной стали.

На основании теории упругоползучего тела, развитие остаточных деформаций виброползучести можно вычислить исходя из уравнения:

$$\varepsilon_{pl}^{ocm}(t_2) = \sigma_b^{max}(t_1, t_0) C(t, \tau) + \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial \sigma_b(t_2, t_1)}{\partial \tau} \cdot \left[\frac{1}{E_b} + C(t, \tau) \right] dt, \quad (6)$$

где $\sigma_b^{max}(t_1, t_0)$ – максимальное напряжение цикла в бетоне сжатой зоны, вычисленное по деформациям арматуры в конце площадки текущей.

Возникающие вследствие накопления деформаций остаточные напряжения в рабочей продольной арматуре приводят к образованию и развитию растягивающих напряжений в бетоне сжатой зоны, которые вычисляются по формуле:

$$\sigma_s^{\partial on}(t_2) = A_s \frac{1-\xi}{\xi} E_s'(t) \left[\frac{1}{A_{red}} - \frac{\left(\frac{s_b}{A_b} - a_s\right)(h-x_p)}{J_{red}} \right] \cdot k. \quad (7)$$

Тогда напряжения в продольной растянутой арматуре представляются в виде:

$$\sigma_s^{max}(t_2, t_0) = \sigma_{sy}^{\partial} + \sigma_s^{\partial on}(t_2) + \Delta\sigma_s(t_2), \quad (8)$$

где σ_{sy}^{∂} – динамический предел текучести арматуры; $\sigma_s^{\partial on}(t_2)$ – приращение напряжений в упругопластической стадии.

Для упрощения процесса вычислений значение динамического предела текучести определяется по формуле:

$$\sigma_{sy}^{\partial} = \kappa_{\partial} \cdot \sigma_{sy}. \quad (9)$$

Полные напряжения в бетоне сжатой зоны изгибаемого элемента при малоцикловом нагружении представляются в виде:

$$\sigma_b^{max}(t_2, t_0) = \sigma_b^{max}(t_1, t_0) - \sigma_b^{\partial on}(t_2). \quad (10)$$

Неупругое деформирование продольной растянутой арматуры в нормальном сечении приводит к изменению значений соотношения между минимальными напряжениями цикла в бетоне сжатой зоны и в растянутой арматуре. Причем эти изменения происходят по разным закономерностям в пластических и в упругопластических стадиях деформирования.

В случае пластического деформирования арматуры соотношение минимальных и максимальных напряжений цикла арматуры постоянное, но отличается от соотношения минимальных и максимальных напряжений внешней нагрузки $\rho_M = \frac{M_{max}}{M_{min}}$. При минимальных значениях внешних нагрузок продольная растянутая арматура деформируется упруго, поэтому напряжение зависит от величины нагрузки. В том же цикле и на этой же стадии при максимальной нагрузке напряжения в арматуре выше предела текучести деформирование равняется значению динамического предела текучести, т.е.

$$\sigma_s^{max}(t_1, t_0) = \sigma_{sy}^{\partial}. \quad (11)$$

В этом случае коэффициент асимметрии цикла напряжений вычисляется по формуле:

$$\rho_{st1} = \frac{\sigma_s^{min}(t_1, t_0)}{\sigma_{sy}^{\partial}}, \quad (12)$$

где $\sigma_s^{min}(t_1, t_0)$ – напряжения в арматуре на уровне минимальной нагрузки цикла, при этом необходимо иметь ввиду, что $\rho_{st1} > \rho_M = \frac{M_{max}}{M_{min}}$.

При упругопластическом деформировании арматуры, вследствие развития деформаций виброползучести бетона сжатой зоны, появляются и развиваются дополнительные остаточные напряжения $\sigma_s^{\partial on}(t_2)$. Коэффициент асимметрии цикла напряжений представляется в виде:

$$\rho_{st2} = \frac{\sigma_s^{min}(t_2) + \sigma_s^{\partial on}(t_2)}{\sigma_s^{max}(t_2) + \sigma_s^{\partial on}(t_2)}, \quad (13)$$

где $\sigma_s^{max}(t_2) = \sigma_{sy}^{\partial} + \Delta\sigma_s(t_2)$. Следует добавить, что $\rho_{st1} > \rho_{st2} > \rho_M$ соотношение минимальных и максимальных напряжений цикла бетона сжатой зоны уменьшается при увеличении циклов нагружения и не зависит от стадии неупругой работы продольной растянутой арматуры.

В условиях пластического деформирования продольной растянутой арматуры соотношение минимальных и максимальных напряжений в сжатой зоне бетона зависит от значения пластических деформаций арматуры и уменьшается при увеличении количества малоциклового нагружения.

В пластической стадии деформирования арматуры коэффициент асимметрии цикла напряжений в бетоне сжатой зоны представляется в виде:

$$\rho_b(t_1) = \frac{\sigma_b^{\min}(t_1, t_0)}{\sigma_b^{\max}(t_1, t_0)}, \quad (14)$$

где $\sigma_b^{\min}(t_1, t_0)$ – напряжение в бетоне сжатой зоны на уровне минимальной нагрузки цикла; $\sigma_b^{\max}(t_1, t_0)$ – напряжение в бетоне сжатой зоны на уровне максимальной нагрузки цикла.

Напряжения в бетоне сжатой зоны при максимальных значениях внешней нагрузки вычисляются по формуле (2) исходя от суммарной величины деформаций:

$$\varepsilon_b^{\max}(t_1, t_0) = \varepsilon_b^{\max}(t_0) + \varepsilon_b^{\partial on}(t_1), \quad (15)$$

где $\varepsilon_b^{\partial on}(t_1)$ – дополнительные деформации бетона на уровне максимальной нагрузки цикла вследствие проявления деформаций виброползучести арматуры.

Таким образом, при упругопластическом деформировании продольной растянутой арматуры коэффициент асимметрии цикла напряжений в бетоне сжатой зоны представляется в виде:

$$\rho_s(t_2) = \frac{\sigma_b^{\min}(t_1, t_0) + \sigma_b^{\partial on}(t_2)}{\sigma_b^{\max}(t_2) + \sigma_b^{\partial on}(t_2)}, \quad (16)$$

где $\sigma_b^{\partial on}(t_2)$ – дополнительные напряжения в бетоне сжатой зоны вследствие проявления неупругих деформаций бетона в связанных условиях.

На основании (7) выражение (16) можно представить в виде:

$$\rho_b(t_2) = \frac{\sigma_b^{\min}(t_1, t_0) + \frac{1-\xi}{\xi} A_s E_s'(t) \cdot \left[\frac{1}{A_{red}} - \frac{\left(\frac{S_b}{A_b} - a_s\right)(h - x_p)}{J_{red}} \right]}{\sigma_b^{\min}(t_1, t_0) + \frac{1-\xi}{\xi} A_s E_s'(t) \cdot \left[\frac{1}{A_{red}} - \frac{\left(\frac{S_b}{A_b} - a_s\right)(h - x_p)}{J_{red}} \right]} \cdot \frac{\left\{ \sigma_b^{\max}(t_1, t_0) C(t, \tau) + \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial \sigma_b(t, t_0)}{\partial \tau} \cdot \left[\frac{1}{E_b} + C(t, \tau) \right] dt \right\}}{\left\{ \sigma_b^{\max}(t_1, t_0) C(t, \tau) + \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial \sigma_b(t, t_0)}{\partial \tau} \cdot \left[\frac{1}{E_b} + C(t, \tau) \right] dt \right\}}. \quad (17)$$

Полученные формулы (14) и (17) позволяют сделать вывод о том, что при увеличении количества циклов нагружения уменьшается коэффициент асимметрии цикла напряжений в бетоне сжатой зоны, т.е. $\rho_b(t_2) < \rho_b(t_1) < \rho_M = \frac{M_{max}}{M_{min}}$.

4. Обсуждение

При деформировании арматуры в пластических и упругопластических стадиях напряжено-деформированное состояние в сечениях с трещиной и между трещинами различное неупругое и упругое, соответственно, что требует учитывать этой закономерности в практических расчетах.

Для оценки выносливости нормальных сечений изгибаемых железобетонных конструкций в условиях малоциклового нагружения при неупругом деформировании арматуры рассматриваются осредненные сечения, соответствующие средним деформациям в бетоне сжатой зоны и в арматуре.

Средние деформации в бетоне сжатой зоны:

$$\varepsilon_{bm} = \varepsilon_b \cdot \Psi_b, \quad (18)$$

где ε_b – деформации сечения с трещиной; Ψ_b – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения деформаций бетона сжатой зоны на участке между трещинами, в практических расчетах можно принимать $\Psi_b = 0,9$.

Осредненные деформации арматуры при ее работе в неупругой стадии представляются в виде:

$$\varepsilon_{sm}(N) = \varepsilon_s(N), \quad (19)$$

где Ψ_b – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения деформаций арматуры при ее работе за пределом упругости.

На стадии упругого деформирования средние деформации арматуры представляются в виде:

$$\varepsilon_{sm}(N) = \varepsilon_s(N) \cdot \Psi_s, \quad (20)$$

где Ψ_s – коэффициент, учитывающий работу бетона растянутой зоны между трещинами, вычисляется по формуле (22); Ψ_{el} – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения деформации арматуры при её пластическом деформировании.

Коэффициент Ψ_{el} при пластическом деформировании арматуры вычисляется по формуле:

$$\Psi_{s1} = \bar{\Psi}_s - \frac{\varepsilon_s(N) - \varepsilon_{sHy}}{\varepsilon_{sky} - \varepsilon_{sHy}} (\bar{\Psi}_s - \bar{\Psi}_{s1}), \quad (21)$$

где $\bar{\Psi}_s$ – коэффициент, учитывающий работу бетона растянутой зоны между трещинами при упругом деформировании арматуры при деформациях $\varepsilon_{se,u}$; $\varepsilon_s(N)$ – деформации в сечении с трещиной в рассматриваемый момент времени; ε_{sHy} – деформации арматуры в начале площадки текучести; ε_{sky} – деформации арматуры в конце площадки текучести; $\bar{\Psi}_{s1}$ – предельное значение Ψ_{el} при $\varepsilon_s(N) = \varepsilon_{sky}$.

Коэффициент $\bar{\Psi}_s$ определяется из условия, что изгибающий момент от действия внешней нагрузки в сечении с трещиной и между трещинами один и тоже:

$$\bar{\Psi}_s = 1 - \frac{kN_{bt}(N)/E_s A_s}{\varepsilon_{sHy}} \cdot \beta, \quad (22)$$

где $N_{bt}(N)$ – усилие в бетоне растянутой зоны между трещинами, принимаемое равным усилию перед образованием трещин. Вычисляется по (12) при значениях деформации бетона $\varepsilon_{bt} = \varepsilon_{btu}$; в практических расчетах значения β и k можно принимать равные 0,6 и 0,8 соответственно. При упругопластическом деформировании арматуры коэффициент Ψ_{el} вычисляется по формуле (21) заменой ε_{sHy} на ε_{sky} и $\varepsilon_{sky} \approx 0,02$.

5. Заключение

1. Деформирование продольной растянутой арматуры изгибаемого железобетонного элемента при малоцикловом нагружении характеризуется рядом особенностей, например, неравномерным развитием деформаций по длине стержней, обусловленным наличием трещин в бетоне растянутой зоны;

2. Выявлены особенности напряженно-деформированного состояния железобетонных изгибаемых элементов в зоне действия изгибающих моментов при деформировании арматуры в пластической и упругопластической стадии, которые заключаются в следующем:

- в сечениях с трещиной начинается интенсивное развитие деформаций по площадке текучести, а на участках между трещинами происходит менее интенсивное развитие деформаций арматуры, и в результате начинает увеличиваться неравномерность деформаций по длине арматуры;

- появляются вторичные трещины, которые начинаются в нормальных трещинах и развиваются по направлениям параллельных либо слабонаклонных к сжатой грани элементов;

- неупругое деформирование арматуры и бетона железобетонного изгибаемого элемента при малоцикловом нагружении вносит существенные изменения в характер напряженного состояния бетона сжатой зоны и растянутой рабочей арматуры. Напряжения и коэффициенты асимметрии цикла напряжений в бетоне сжатой зоны уменьшаются, а напряжения и коэффициенты асимметрии цикла напряжений в рабочей растянутой арматуре увеличиваются по мере увеличения количества циклов нагружения при постоянных величинах максимальной нагрузки цикла и коэффициента асимметрии цикла внешней нагрузки.

Список библиографических ссылок

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.jobe.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., Özbolt 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.
16. Zhang G., Zhang Y., Zhou Y. Fatigue Tests of Concrete Slabs Reinforced with Stainless Steel Bars // *Advances in Materials Science and Engineering.* 2018. № 1. DOI: 10.1155/2018/5451398.
17. Barcley L., Kowalsky M. Critical bending strain of reinforcing steel and the buckled bar tension test // *ACI Materials Journal.* 2019. № 3 (116). P. 53–61. DOI: 10.14359/51715583.
18. Luo X., Tan Z., Chen Y. F., Wang Y. Comparative study on fatigue behavior between unbonded prestressed and ordinary reinforced reactive powder concrete beams // *Mater. Test.* 2019. № 4 (61). P. 323–328. DOI: 10.3139/120.111323.
19. Tang S. W., Yao Y., Andrade C., Li Z. Recent durability studies on concrete structure // *Cem Concr Res* 2015. № 78. P. 143–154. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.05.021.
20. Berrocal C. G., Fernandez I., Lundgren K., Lofgren I. Corrosion-induced cracking and bond behaviour of corroded reinforcement bars in SFRC // *Compos B Eng.* 2017. № 113. P. 123–137. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.01.020.
21. Chen E., Berrocal C. G., Löfgren I., Lundgren K. Correlation between concrete cracks and corrosion characteristics of steel reinforcement in pre-cracked plain and fibre-reinforced concrete beams // *Mater. Struct. Constr.* 2020. № 2 (53). DOI: 10.1617/s11527-020-01466-z.

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

chief engineer

E-mail: fszrkazan@mail.ru

NPPF Fundamentspetsremont

The organization address: 420087, Russia, Kazan, Gvardeyskaya St., 56

**Stress-strain state of normal sections of reinforced concrete elements
under cyclic inelastic deformation of reinforcement****Abstract**

Problem statement. The purpose of the study is to identify the features of the stress-strain state of reinforced concrete structures under low-cycle loading with inelastic deformation of the longitudinal working reinforcement

Results. Based on the results of the study, the development of inelastic deformations in the longitudinal stretched reinforcement makes significant changes in the stress-strain state of the normal cross-section of the bent reinforced concrete element under low-cycle loading in comparison with the case of elastic deformation of the reinforcement. At the same time, there is an uneven development of reinforcement deformations due to the presence of cracks in the concrete of the stretched zone, as well as secondary cracks that begin at the source of normal cracks and develop in the directions parallel or slightly inclined to the compressed face of the elements. Analytical studies of the influence of higher-specified factors on the stress-strain state of normal sections of a reinforced concrete element in the zone of compressed bending are performed. Based on the research results, the equations of the mechanical state of concrete of the compressed zone and the stretched longitudinal zone of the reinforcement under inelastic deformation of the reinforcement are developed.

Conclusions. The significance of the results for theories of reinforced concrete and the construction industry includes the fact that established on the basis of theoretical studies the stress-strain state of normal sections in the zone of pure bending under cyclic loading allows more accurate assessment of the mechanical concrete of the compression zone and the longitudinal main reinforcement in terms of cyclic inelastic deformation of the reinforcement, which is a significant contribution to the theory of fatigue strength to ensure a saving of concrete and steel reinforcement up to 20 % compared to the same calculation methods.

Keywords: low-cycle endurance, reinforced concrete, reinforcement, inelastic deformations yield strength, normal sections, cracks, normal stresses, compressed zone concrete, cycle asymmetry coefficient.

For citation: Mirsayapov Ilizar T., Garifullin D. R. Stress-strain state of normal sections of reinforced concrete elements under cyclic inelastic deformation of reinforcement // Izvestija KGASU. 2020. № 4 (54). P. 44–53.

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., Ozbolt 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.
 16. Zhang G., Zhang Y., Zhou Y. Fatigue Tests of Concrete Slabs Reinforced with Stainless Steel Bars // Advances in Materials Science and Engineering. 2018. № 1. DOI: 10.1155/2018/5451398.
 17. Barcley L., Kowalsky M. Critical bending strain of reinforcing steel and the buckled bar tension test // ACI Materials Journal. 2019. № 3 (116). P. 53–61. DOI: 10.14359/51715583.
 18. Luo X., Tan Z., Chen Y. F., Wang Y. Comparative study on fatigue behavior between unbonded prestressed and ordinary reinforced reactive powder concrete beams // Mater. Test. 2019. № 4 (61). P. 323–328. DOI: 10.3139/120.111323.
 19. Tang S. W., Yao Y., Andrade C., Li Z. Recent durability studies on concrete structure // Cem Concr Res 2015. № 78. P. 143–154. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.05.021.
 20. Berrocal C. G., Fernandez I., Lundgren K., Lofgren I. Corrosion-induced cracking and bond behaviour of corroded reinforcement bars in SFRC // Compos B Eng. 2017. № 113. P. 123–137. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.01.020.
 21. Chen E., Berrocal C. G., Löfgren I., Lundgren K. Correlation between concrete cracks and corrosion characteristics of steel reinforcement in pre-cracked plain and fibre-reinforced concrete beams // Mater. Struct. Constr. 2020. № 2 (53). DOI: 10.1617/s11527-020-01466-z.