

УДК 691.328.1

Мирсаяпов Илизар Талгатович

доктор технических наук, профессор

Email: mirsayapov1@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

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

Экспериментальные исследования выносливости железобетонных балок

Аннотация

Постановка задачи. Цель исследования – установить характер разрушения и закономерностей развития деформаций бетона сжатой зоны железобетонных балок при режимном циклическом нагружении в зависимости от прочности и деформативности бетона, арматуры, размеров поперечного сечения и количества продольной рабочей арматуры. Железобетонные конструкции зданий и сооружений в процессе эксплуатации подвергаются воздействию циклических нагрузок различного режима и характера воздействия. Поэтому разработано достаточно большое количество методик расчета усталостной прочности железобетонных конструкций. Указанные методики не имеют достаточного экспериментального обоснования, особенно при режимных, циклических нагружениях, что не позволяет достоверно оценивать усталостную прочность и разрабатывать оптимальные и одновременно надежные проектные решения.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в экспериментальных исследованиях поведения железобетонных балок прямоугольного сечения при режимных циклических нагружениях. Установлен характер развития повреждения и разрушения балок по бетону сжатой зоны.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в установлении характера и вида разрушения, а также закономерности деформирования бетона сжатой зоны в процессе циклического нагружения. Для принятых параметров нагружения железобетонных балок, разрушение происходило по бетону сжатой зоной вследствие образования и развития трещин усталости в бетоне. При многократном повторном нагружении происходило деформирование сжатых волокон бетона на всем протяжении испытаний. Основная часть деформаций происходила вначале нагружения примерно до $5 \cdot 10^4$ - 10^5 циклов нагружений.

Ключевые слова: железобетонная балка, нормальное сечение, бетон сжатой зоны, циклическое нагружение, деформации бетона, характер разрушения.

Для цитирования: Мирсаяпов Илизар Т. Экспериментальные исследования выносливости железобетонных балок. // Известия КГАСУ. 2021. № 3 (57). С. 12-22. DOI: 10.52409/20731523_2021_3_12.

1. Введение

В связи с тем, что железобетонные конструкции зданий и сооружений в процессе эксплуатации подвергаются воздействию циклических нагружений, разработано большое количество методик расчета усталостной прочности [1-5]. Однако эти методики не имеют достаточного экспериментального обоснования, либо экспериментальные исследования не подкреплены методикой расчета [6-10]. В связи с этим выполнены экспериментальные исследования железобетонных балок прямоугольного сечения с одиночной арматурой. Проведены испытания шести серий образцов, в каждом из них образцы имели одинаковые прочности бетона, диаметр и площадь продольной рабочей арматуры, и режим нагружения. Прочностные и геометрические параметры балок и режимы нагружения приведены далее.

В связи с вышеизложенным, целью исследования являются экспериментальные исследования закономерностей поведения железобетонных изгибаемых элементов при режимных циклических нагружениях. Задачами исследования являются:

1. Изготовление опытных образцов, выбор расчетной схемы испытания;

2. Установление закономерностей, вида и характера разрушения железобетонных балок;
3. Изучение закономерностей развития деформаций бетона сжатой зоны;
4. Анализ полученных результатов.

2. Материалы и методы

Испытания на воздействие циклических нагрузений проводили на гидравлическом прессе с пульсатором МУП-100 с частотой приложения нагрузки 600 циклов в минуту с коэффициентом асимметрии цикла нагрузки от 0,33 до 0,5.

Размеры сечения балок, количество продольной и поперечной арматуры, прочность бетона назначались с таким расчётом, чтобы разрушение происходило по бетону сжатой зоны в пределах зоны чистого изгиба. Армирование наклонных сечений опытных балок осуществлялась сварными каркасами из арматуры класса АШ, диаметром 12 мм. Конструкции опытных образцов и схема испытаний приведены на рис. 1.

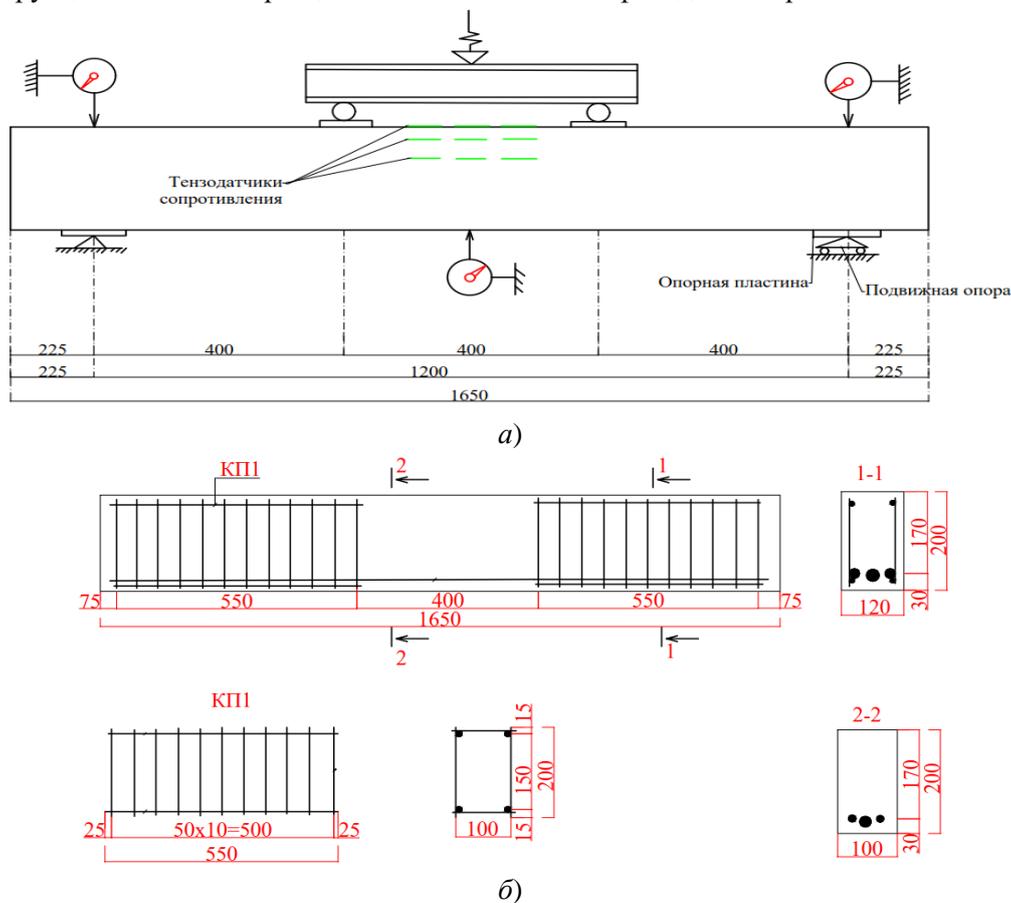


Рис. 1. а) Схема испытания балок; б) Армирование железобетонных балок (иллюстрация автора)

Для приготовления бетонных смесей использовался портландцемент активностью 50 МПа, песок с модулем крупности 1,45, щебень гранитный, фракции 5-15 мм. Параметры образцов, отличающиеся в пределах серий, механические характеристики бетонов и арматуры, режимы испытаний по сериям представлены в таблицах 1-3.

Таблица 1

Механические характеристики бетонов опытных составов.

| № составов | На 28 суток | | | Средние в период испытаний | | | | |
|------------|-------------|-------------|----------------|----------------------------|-----------|-------------|----------------|-------------|
| | R , МПа | R_b , МПа | R_{bt} , МПа | $E_b \cdot 10^{-4}$, МПа | R , МПа | R_b , МПа | R_{bt} , МПа | E_b , МПа |
| 1 | 50,0 | 33 | 2,0 | 3,3 | 55 | 36 | 2,2 | 34800 |
| 2 | 50,0 | 34 | 2,0 | 3,4 | 55 | 36 | 2,2 | 35000 |

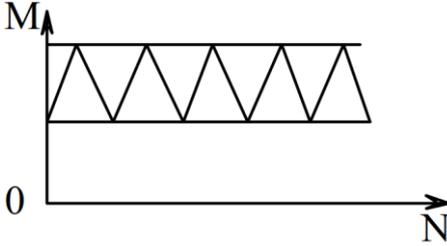
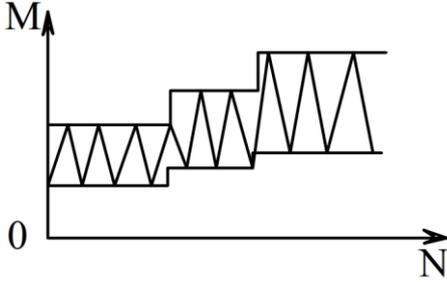
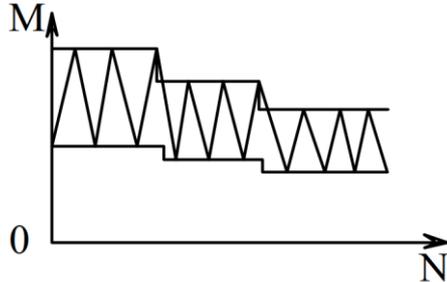
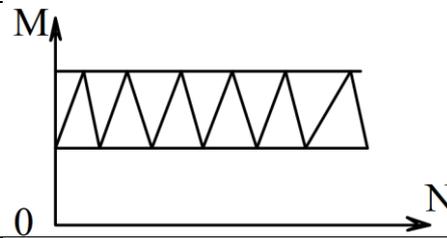
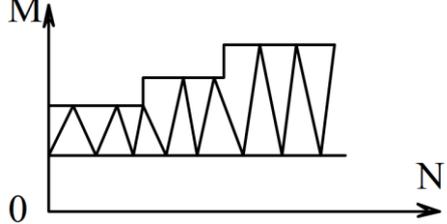
Таблица 2

Механические характеристики арматурных сталей.

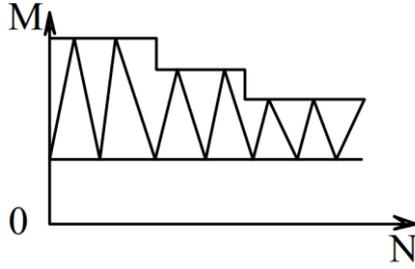
| Диаметр арматуры, мм и класс | | A_s , см ² | σ_y , МПа | σ_u , МПа | δ_p , % | $E_b \cdot 10^{-5}$ МПа |
|------------------------------|--------|----------------------------|---------------------|---------------------|-------------------|----------------------------|
| 1 | 18 АШ | 2,54 | 433,1 | 661,4 | 15,4 | 2,0 |
| 2 | 25 АШ | 4,91 | 420 | 695,0 | 15,4 | 2,0 |
| 3 | 14 АIV | 1,54 | 640 | 960 | 10,0 | 2,0 |

Таблица 3

Характеристики опытных образцов и режимы испытаний.

| № серии | Режим нагружения | Размеры, мм | | Прочно сть, R_b , МПа | A_s , см ² | E_b , МПа | Кол. обр. |
|------------|---|----------------|-----|-------------------------------|----------------------------|----------------|--------------|
| | | b | h | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Б1 |  | 120 | 210 | 36 | 9.99 | 34800 | 6 |
| Б2 |  | 120 | 210 | 36 | 9.99 | 34800 | 9 |
| Б3 |  | 120 | 210 | 36 | 9.99 | 34800 | 9 |
| Б4-1 |  | 120 | 210 | 38 | 7.99 | 35000 | 9 |
| Б4-2 |  | 120 | 210 | 38 | 7.99 | 35000 | 6 |

Продолжение табл. 3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------|---|-----|-----|----|------|-------|---|
| Б4-3 |  | 120 | 210 | 38 | 7.99 | 35000 | 6 |

3. Результаты и обсуждение

Железобетонные балки, испытанные как модель изгибаемого элемента статической и многократно повторяющейся нагрузкой, достигли предельного состояния от действия изгибающих моментов. Разрушение испытанных железобетонных балок происходило по сжатой части бетона в следующей последовательности: образовались волосяные горизонтальных трещин на боковой поверхности балок на расстоянии 1,0-2,5 см от крайней сжатой части сечения на участке между приложенными силами с дальнейшим увеличением длины и ширины раскрытия по мере увеличения количества циклов многократно повторяющихся нагружений. Кроме этого при увеличении количества циклов указанные трещины соединялись друг с другом, образуя единую плоскость разрушения. Затем, после того как длина трещины достигала критической величины $l_{cr} = 25-30$ см., от сжатой части сечения отрываться отдельные куски бетона. Предельное состояние наступало, когда сжатая часть сечения стала недостаточной для восприятия нагрузки, равной максимальному значению нагрузки цикла многократно повторяющейся нагрузки. Следовательно, разрушение балок сжатой части сечения происходило вследствие послойного отрыва волокон бетона из-за развития микро- и макротрещин в процессе многократно повторяющегося нагружения.

Анализ закономерностей образования и развития усталостных трещин позволяет отметить характер развития продольных усталостных трещин в сжатой зоне балок при режимных циклических нагружениях, которые подтверждаются результатами теоретических исследований. При блочном, многогранно повторяющемся нагружении, развитие трещин зависит от последовательности изменения максимальных нагрузок. Внутри каждого блока продольные трещины в бетоне сжатой зоны развиваются так же как при постоянном режиме циклического нагружения. Отличительные особенности проявляются в момент изменения режима нагружения.

При блочном нагружении с последовательным увеличением максимальной нагрузки развивались с большей скоростью, чем при предыдущем этапе с меньшим значением нагрузки в начальной стадии, затем скорость развития трещин замедляется.

Последовательность и закономерность развития трещин в бетоне сжатой зоны балок приведены на рис. 2.

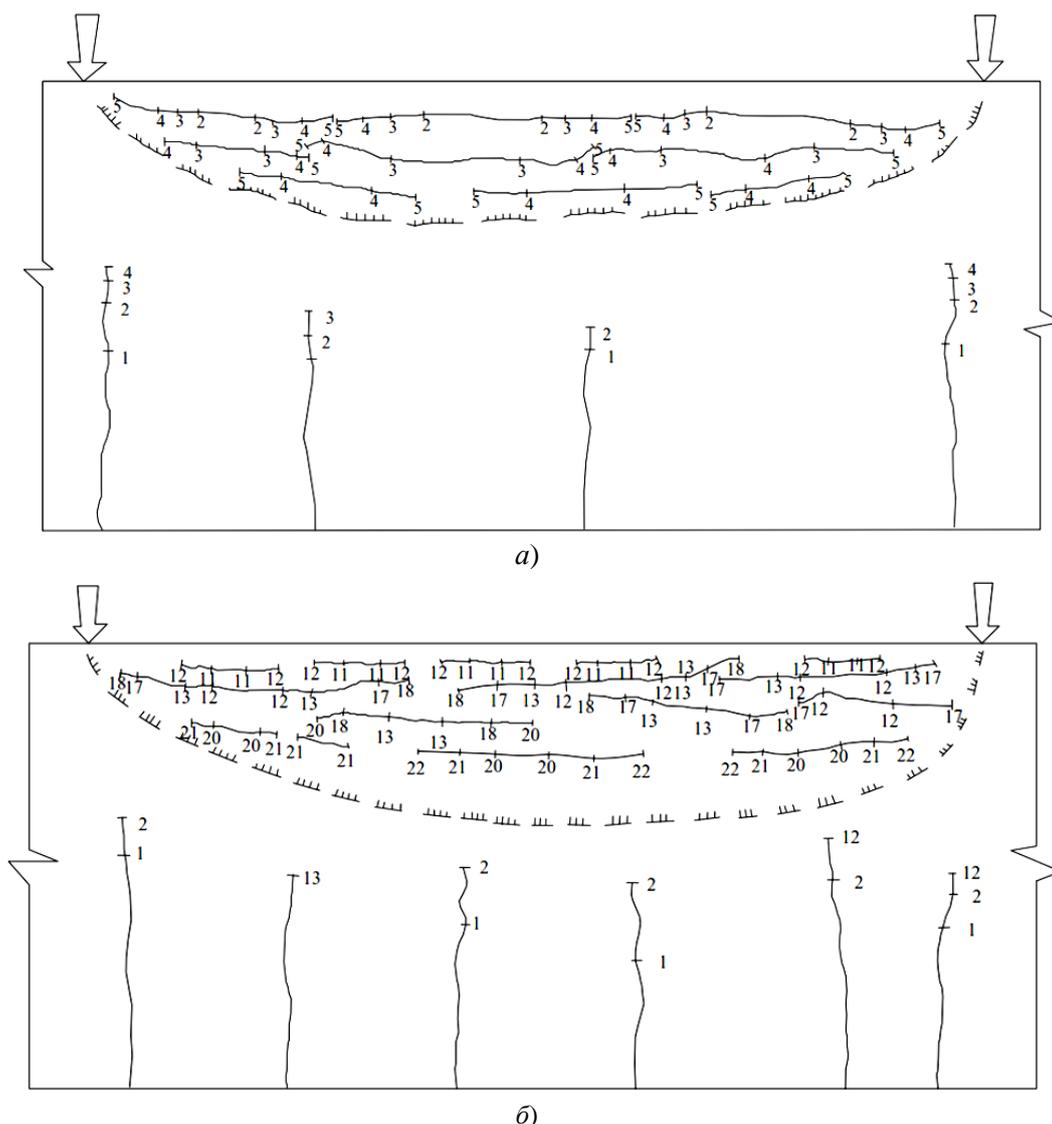


Рис. 2. Картина образования и развития нормальных трещин в растянутой зоне и горизонтальных трещин в бетоне сжатой зоны: а) при стационарном циклическом нагружении; б) при режимном нестационарном циклическом нагружении (иллюстрация автора)

При блочном циклическом нагружении с понижающимся уровнем максимальной нагрузки цикла после уменьшения нагрузки в течение определенного количества циклов трещина не развивается, происходит некоторое уменьшение трещины раскрытия. По истечении «времени задержки» начинается дальнейшее развитие трещины со значительно меньшими скоростями. Закономерности развития продольных трещин в сжатой зоне одинаковы с закономерностями развития деформаций бетона сжатой зоны, и характеризуют уменьшение предела прочности бетона при многократном повторяющемся нагружении.

Известно, что образование и развитие микро- и макротрещин приводит к изменению формы эпюры напряжений сжатой части сечения из треугольной в криволинейную (приближающуюся к прямоугольной) на стадии разрушения. Результаты экспериментальных исследований подтверждают это положение о том, что развитие продольных трещины приводит к преобразованию эпюры напряжений бетона сжатой зоны из треугольника прямоугольной. В характере разрушения балок по бетону сжатой зоны при статической и многократно повторяющейся нагрузке, имеется небольшое различие, заключающееся в разных значениях высоты сжатой зоны при разрушении, при циклическом нагружении высота сжатой зоны имеет большую величину. При этом, чем меньше уровень нагрузки при разрушении, тем больше высота зоны разрушения [11-15].

При многократно повторяющемся нагружении, происходило увеличение деформаций бетона сжатой зоны на всем протяжении испытаний. Сначала рассмотрим развитие деформаций бетона при постоянных величинах параметров нагружения.

При стабильных характеристиках циклического нагружения деформации сжатой части сечения развивались в процессе испытаний. Основная часть деформаций сжатого бетона проявилась в начальных циклах нагружения. Закономерности изменения деформаций сжатой части бетона при увеличении количества циклов нагружения показан на рис. 3. По этим графикам можно увидеть увеличение деформаций и зависимость скорости развития от уровня максимальной нагрузки цикла.

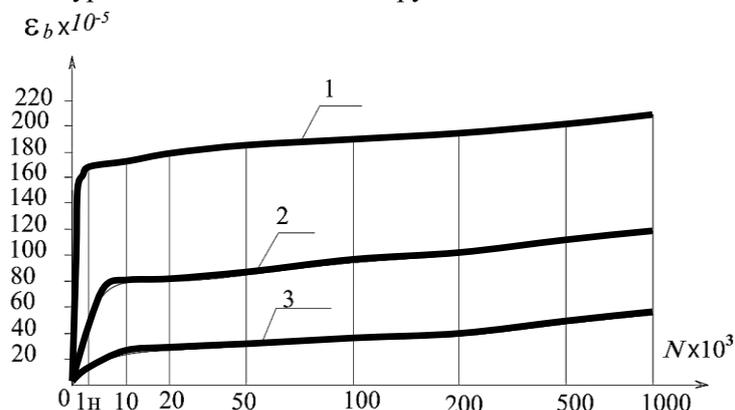


Рис. 3. Характер развития деформаций бетона сжатой зоны на верхних волокнах при постоянных параметрах циклического нагружения. 1 – при M_{max} ; 2 – при M_{min} ; 3 – при $M = 0$ (иллюстрация автора)

Конечные деформации сжатой части бетона при достижении предельного состояния зависят от значения максимальной нагрузки цикла. В случае высоких значений максимальной нагрузки цикла деформации бетона сжатой части сечения, и в момент достижения предела усталости балок имели предельные значения. Так, для балок, испытанных при уровнях максимальной нагрузки $\gamma = 0,735; 0,653; 0,71; 0,9; 0,85$ конечные деформации достигли $2,85 \cdot 10^{-3}; 2,78 \cdot 10^{-3}; 2,75 \cdot 10^{-3}; 2,65 \cdot 10^{-3}; 3,1 \cdot 10^{-3}$. Полученные результаты показывают, что при многократно повторяющихся нагрузках, предельное состояние балок по сжатой части сечения достигает при предельных значениях деформаций для сжатой зоны бетона. Это объясняется изменением формы эпюры напряжений в сжатой зоне из-за развития продольных микро- и макротрещин и выключением из работы части верхних волокон. После образования сплошной трещины отрыва наблюдается некоторое уменьшение деформаций крайних сжатых волокон.

При низких значениях максимальной нагрузки цикла в бетоне сжатой зоны предельные значения деформаций не достигаются. Например, для балок, где $\gamma = 0,52$, $\gamma = 0,571$ деформации при разрушении составляют, соответственно $186 \cdot 10^{-5}$ и $202 \cdot 10^{-5}$, что существенно меньше предельных значений деформации для балок, испытанных при высоких значениях нагрузок.

При действии многократно повторяющихся нагрузок кривые деформаций также изменяются и качественно. Закономерности изменения деформаций верхних фибр бетона при нагружении показано на рис. 4.б. Указанные зависимости построены на основании данных статических ступенчатых загрузений до максимальной нагрузки цикла после определенного количества нагружения и разгрузки. Так, для деформации верхних фибр балки при первом цикле нагружения диаграмма $M - \epsilon$ выпуклая, при $N = 10^4$ циклов - прямолинейная, а при $N = 10^5$ циклов становится вогнутой. Изменение выпуклой зависимости в прямолинейную происходит вследствие того, что при повторяющемся нагружении накапливается большая часть неупругих невозвратных деформаций и бетон начинает деформироваться упруго. Второе изменение - переход прямоугольной диаграммы $M - \epsilon$, в вогнутую связано с развитием нелинейной части деформаций виброползучести сжатой части сечения.

Эти графики показывают, что увеличение полных деформаций бетона сжатой зоны происходит за счет развития их неупругой (невозвратной) составляющей. Деформации

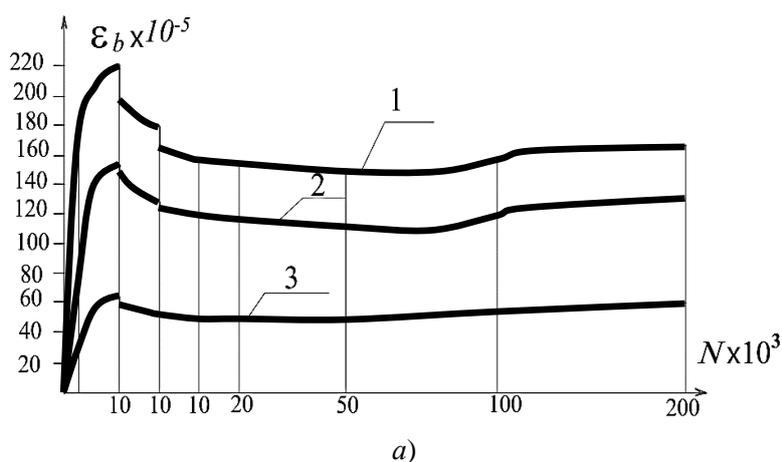
бетона в течение одного цикла от нуля до максимального значения нагрузки с увеличением количества нагружений меняются незначительно. При этом увеличение неупругих деформаций происходит в начальный период повторяющихся нагружений. Например, уже после 10^4 циклов нагружений увеличение неупругих деформаций снижается, однако, увеличение этих деформаций с меньшей интенсивностью продолжается и дальше.

Накопление нелинейных деформаций бетона сжатой части сечения в начальной стадии нагружений вызвано развитием линейных деформаций виброползучести. Увеличение нелинейных деформаций бетона сжатой части сечения зависит от развития микро- и макротрещин в сжатой части сечения.

На основании анализа зависимости развития деформаций бетона сжатой зоны можно заключить, что изменение формы графика $M-\varepsilon$ позволяет предсказать характер разрушения железобетонных балок.

При последовательно повышающихся и понижающихся, многократно повторяющихся циклических нагружениях графики деформаций меняются количественно и качественно. Графики деформаций на уровне верха сжатой зоны сечения балки показывают, что при первом статическом нагружении диаграмма $M-\varepsilon$ выпуклая относительно оси деформации, при $N = 20 \cdot 10^3$ циклов – прямолинейная, а при 10^5 циклов – становится вогнутой. Указанные графические зависимости согласуются с закономерностями развития деформаций в координатах $\varepsilon - N$. В пределах каждого блока увеличение полных деформаций бетона сжатой зоны происходит за счет увеличения неупругой части. Упругие деформации в пределах одного цикла изменяются мало. Увеличение неупругих деформаций наиболее заметно проявляется в начальной стадии нагружения в пределах первого блока, что связано со сжатием гелевой составляющей бетона, на следующих этапах происходит стабилизация деформаций.

Накопление полных деформаций бетона сжатой части сечения при последовательно понижающемся режиме блочного нагружения, наблюдалось на всех этапах испытания. Закономерности проявления деформаций бетона сжатой части сечения при увеличении количества нагружений показаны на рис. 4.в. как видно из рис. 4.а, в первом блоке нагружения развитие деформации бетона сжатой части сечения был аналогичным развитию деформаций при нагружении со стабильными характеристиками. В момент уменьшения нагрузки в последующих блоках наблюдается относительная стабилизация деформаций в пределах блока нагружения. Эти процессы повторяются в течение последующих блоков после уменьшения максимальной нагрузки цикла.



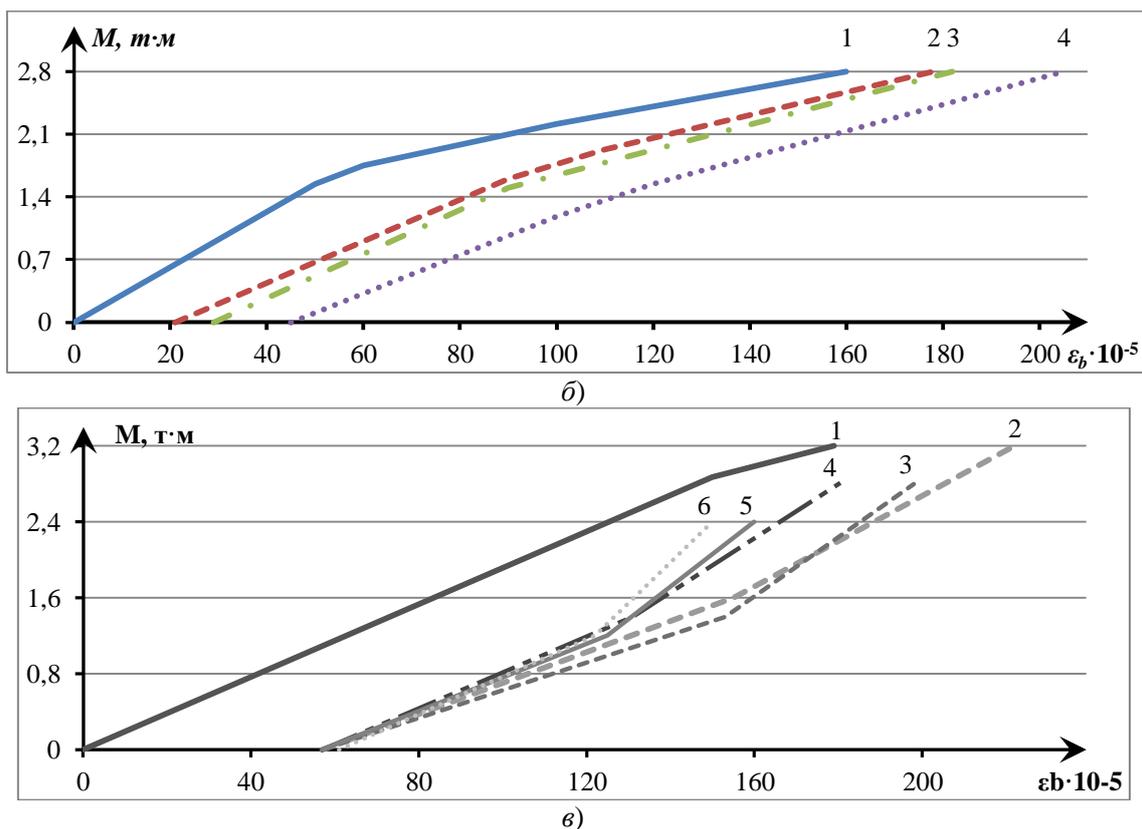


Рис. 4. а) Закономерности изменения деформаций бетона на уровне верхней грани при последовательно понижающемся режиме. 1 – при M_{max} ; 2 – при M_{min} ; 3 – при $M = 0$; б) Закономерности изменения деформаций бетона сжатой зоны на различных этапах нагружения: 1 – $N = 1$; 2 – $N = 10^4$; 3 – $N = 5 \cdot 10^4$; 4 – $N = 10^6$; в) Закономерности характера деформирования бетона сжатой зоны на различных стадиях нагружения: 1 – $N = 1$; 2 – $N = 10^4$; 3 – $N = 1$; 4 – $N = 10^4$; 5 – $N = 1$; 6 – $N = 2 \cdot 10^5$ (иллюстрации автора)

Количество циклов в этот период и закономерности развития деформаций зависят от величины скачка нагрузки и количества циклов в этом блоке: чем больше перепад нагрузки, тем больше количество циклов без развития деформаций и степень уменьшения деформаций. При действии многократно повторяющейся нагрузки с понижениями максимальной нагрузки происходит изменение диаграмм $M - \varepsilon$, связанное с характером деформирования бетона сжатой зоны. Качественные превращения диаграммы деформирования в координатах $M - \varepsilon$ на разных блоках нагружения по мере увеличения количества циклов нагружения, характеризуют степень расходования пластического ресурса материала и степень развития микро- и макротрещин в теле бетона сжатой зоны.

4. Заключение

Выполненные экспериментальные исследования 48 железобетонных балок на действие, многократно повторяющиеся нагрузки стационарного и нестационарного режимов позволили установить следующие основные закономерности поведения этих конструкций под нагрузкой:

1. При принятых параметрах многократно повторяющейся нагрузке разрушение железобетонных балок с использованием бетона средней прочности при высоких значениях коэффициента армирования происходило по бетону сжатой зоны вследствие образования и развития микро- и макротрещин усталости.

2. Многократно повторяющиеся нагружения приводили к увеличению деформации бетона сжатой зоны на протяжении испытаний, независимо от режима нагружения.

3. Режим нагружения оказывает влияние на общую скорость развития полных деформаций бетона после изменения максимальных значений напряжений в блоках нагружения.

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.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. Wang D., Chen H., Ma K., Yu Q., Tang, Y. Investigations on fracture properties of concrete under cyclic loading // *Yingyong Lixue Xuebao Chinese Journal of Applied Mechanics* 37 (6), P. 2317-2324. DOI: 10.11776/cjam.37.06.B136.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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

Mirsayapov Iizar Talgatovich

Doctor of technical sciences, professor

Email: mirsayapov1@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

Organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya str., 1

Experimental studies of the endurance of reinforced concrete beams**Abstract.**

Problem statement. The purpose of the study is to identify the regularities of the development of deformations of concrete in the compressed zone during cyclic loading of stationary and non-stationary modes. Since reinforced concrete structures of buildings and structures are exposed to cyclic loads of various modes and types of impact during operation, a fairly large number of methods for calculating the fatigue strength of reinforced concrete structures have been developed. However, these methods do not have sufficient experimental justification.

Results. The main results of the study consist in experimental studies of the endurance of the normal sections of reinforced concrete beams of rectangular cross-section under stationary and non-stationary modes of cyclic loading. The nature of the development of damage and destruction of beams of the compressed zone concrete is established.

Conclusions. The significance of the obtained results for the construction industry consists in establishing the regularity of the development of deformations of concrete in the compressed zone during cyclic loading of stationary and non-stationary modes. For the accepted parameters of loading of reinforced concrete beams, the destruction occurred along the concrete in a compressed zone due to the formation and development of fatigue cracks in the concrete. In the concrete of the compressed zone, under the cyclic loads, deformations developed, which increased regardless of the cyclic loading mode. The main part of the deformations occurred at the beginning of loading up to about $5 \cdot 10^4$ - 10^5 loading cycles.

Keywords: reinforced concrete beam, normal cross-section, compressed zone concrete, cyclic loading, concrete deformations, nature of destruction.

For citation: Mirsayapov Iizar T. Experimental studies of the endurance of reinforced concrete beams. Izvestiya KGASU. 2021. No. 3 (57). P. 12–22. DOI: 10.52409/20731523_2021_3_12.

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. Wang D., Chen H., Ma K., Yu Q., Tang, Y. Investigations on fracture properties of concrete under cyclic loading // Yingyong Lixue Xuebao Chinese Journal of Applied Mechanics 37 (6), P. 2317-2324. DOI: 10.11776/cjam.37.06.B136.
7. Mirsayapov Iishat 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.
8. 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.
 9. 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.
 10. 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.
 11. 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.
 12. 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.
 13. Augard 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.
 14. 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.
 15. 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