

УДК 69:624.046

¹Карапетян С. Х., ²Емец Е. В., ²Псюк В. В.¹Луганский государственный университет имени Владимира Даля,²Донбасский государственный технический университет

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ БЕТОНА В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ СТОЙКАХ ПРИ МАЛОЦИКЛОВЫХ НАГРУЖЕНИЯХ ВЫСОКИХ УРОВНЕЙ

Статья посвящена экспериментальному и теоретическому исследованиям работы бетона в железобетонных внецентренно сжатых элементах в условиях повторных нагружений. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния повторных нагружений и способ оценки процесса деформирования бетона сжатой зоны стоек при повторных нагружениях.

Ключевые слова: бетон, железобетон, внецентренное сжатие, прочность, деформации, малоцикловые нагружения, количество циклов нагружений, напряженно-деформированное состояние.

В строительстве одним из путей повышения эффективности, долговечности и надежности железобетонных конструкций является совершенствование методов их расчета, учитывающих как физическую нелинейность материалов, так и изменение геометрии конструкций в процессе деформирования. В большинстве случаев ряд строительных конструкций подвергается действию многократно повторных (малоцикловых) нагружений, которые нередко превышают расчетные значения. При этом разрушение конструкций может происходить вследствие малоциклового усталости, обусловленной упругопластическим деформированием бетона. Поэтому интерес к проблематике малоциклового усталости железобетона и исследование влияния малоцикловых нагружений на диаграмму деформирования бетона и напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций в настоящее время являются актуальными [1]. При повторных нагружениях (в отличие от однократных) сопротивление материалов разрушению зависит от их способности сопротивляться циклическому деформированию. Поэтому разрабатываемые методы расчета должны быть построены на основе реальных диаграмм деформирования, учитывающих изменение физико-механических свойств бе-

тона и арматурной стали в зависимости от условий эксплуатации конструкции [1, 2].

Результаты экспериментальных исследований [1–4] показывают, что диаграммы деформирования бетона при повторных нагружениях изменяются (трансформируются). Это свидетельствует об изменении деформативных и прочностных свойств бетона, что в основном связано с накоплением пластических (необратимых) деформаций. Особенностью работы бетона при этом является то, что он, в зависимости от параметров (уровня, скорости, коэффициента асимметрии и количества циклов) повторных нагружений, последовательно проходит присущие ему три характерных стадии упругопластического деформирования: интенсивный выбор пластических деформаций (уплотнение бетона), условная стабилизация приращений деформаций (упругая работа бетона), ускоренный рост деформаций (разуплотнение структуры бетона). Такая закономерность деформирования сжатого бетона, как показывают опыты [2, 5], наблюдается и при испытании железобетонных внецентренно сжатых и изгибаемых элементов. Это позволяет заключить, что характер деформирования и механизм потери несущей способности железобетонных конструкций зависят от особенностей деформирования исход-

ных материалов. Однако с точки зрения оценки процессов упругопластического деформирования бетона, железобетона и выполненных из них элементов конструкций представляют интерес графики нарастания деформаций. Они отражают зависимость между деформациями и числом циклов нагружений, т. е. кинетику деформирования материала. Для оценки напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов можно также использовать кривые нарастания перемещений, которые дают возможность проанализировать закономерность изменения прогибов в зависимости от количества циклов нагружений.

Объект исследования — железобетонные конструкции в условиях многократно повторных (малоцикловых) нагружений.

Предмет исследования — прочность и устойчивость железобетонных внецентренно сжатых элементов при многократно повторных (малоцикловых) нагружениях.

Цель работы — исследование напряженно-деформированного состояния и работы бетона в железобетонных элементах при малоцикловых нагружениях.

В лаборатории кафедры «Строительные конструкции» были проведены экспериментальные исследования влияния многократно повторных (малоцикловых) нагружений высоких уровней на несущую способность внецентренно сжатых стоек, которые были разделены на три серии в зависимости от параметров нагружения: С-I (однократно нагружаемые), С-II и С-III (повторно нагружаемые) по 3 образца в каждой.

На рисунках 1 и 2 соответственно представлены кривые нарастания деформаций (кривые циклической ползучести) бетона сжатой фибры и прогибов стоек серий С-II и С-III [2].

Стойки серии С-II испытаны на базе 14-ти предварительных циклов, после которых доводились до разрушения однократным нагружением, а стойки серии С-III подвергались воздействию повторных нагружений вплоть до их разрушения.

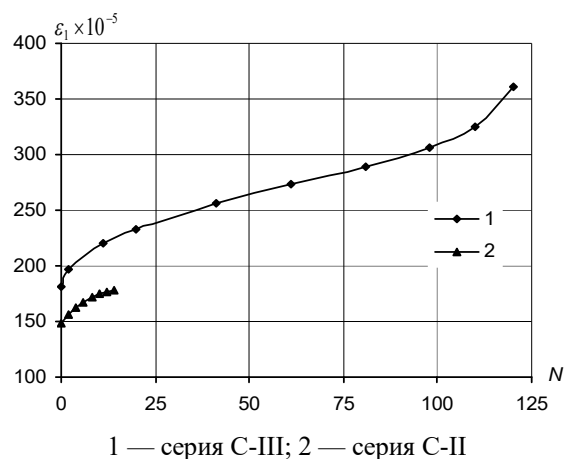


Рисунок 1 — Кривые нарастания деформаций на сжатой фибре стоек

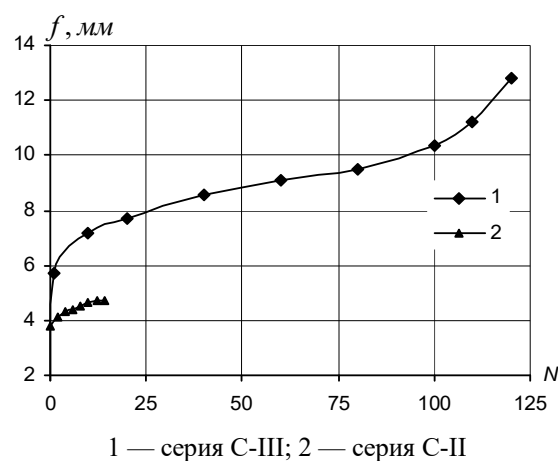


Рисунок 2 — Кривые нарастания прогибов в середине стоек в зависимости от количества нагружений

Из рисунков 1 и 2 видно, что кривые по своему характеру близки между собой и аналогичны кривым ползучести при длительном действии нагрузки и имеют характерные участки (серия С-III), соответствующие трем стадиям упругопластического деформирования бетона. Исходя из данного анализа, в кривых циклической ползучести и прогибов стоек также можно выделить характерные участки, соответствующие трем стадиям упругопластического деформирования бетона. Как видно из рисунков, нарастание прогибов и деформаций вначале происходило интенсивно с уменьшением скорости деформирования (I участок). Затем

процесс деформирования стабилизировался (условно), то есть, увеличение деформаций и прогибов происходило с постоянной скоростью (II участок). Далее интенсивность деформирования снова возрастала (до предельных значений) и приводила к чрезмерному увеличению прогибов, вследствие чего стойки разрушались (III участок). Кривые стоек серии С-II отличаются от С-III тем, что у них отсутствуют участки II и III. Это связано с тем, что они доводились до разрушения в период стабилизации роста деформаций. Необходимо отметить, что нарастание деформаций в условиях повторных нагружений в основном происходило за счет развития циклической ползучести, которая способствовала росту остаточных деформаций и прогибов стоек. Последние приводили к увеличению начального эксцентриситета приложения сжимающей нагрузки и внешнего изгибающего момента. Рост остаточных (пластических) деформаций является признаком наступления малоциклового усталости в результате постепенного накопления микроповреждений в бетоне.

Кроме того, необходимо отметить, что нарастание деформаций и прогибов, а также накопление повреждений в стойках под действием повторных нагружений происходило в основном за счет развития циклической ползучести бетона, что способствовало росту необратимых (остаточных) деформаций и прогибов после каждого снижения нагрузки до величины P_{\min}^{cyc} (нижний уровень нагружений) (рис. 1, 2). При этом следует отметить, что с нарастанием остаточных деформаций и прогибов (от цикла к циклу) стойки постепенно искривлялись (изменение геометрии стоек). Вследствие этого, начиная со второго цикла (в середине длины стоек), увеличивался и начальный (заданный) эксцентриситет приложения сжимающей нагрузки на величину остаточного прогиба (рис. 3).

Вместе с тем следует отметить, что с увеличением числа циклов нагружений и перераспределением усилий, как показал анализ экспериментальных данных, высота сжатой зоны бетона стоек (определяе-

мая по фибровым деформациям) постепенно уменьшалась (рис. 4).

Как следует из рисунка 4, кривая (наиболее характерная) изменения высоты сжатой зоны сечения стойки С-III-1 h_c-n практически является подобием (в зеркальном отображении) кривых циклической ползучести бетона стоек (рис. 1) и имеет соответствующие характерные участки. При этом кривую h_c-n также можно разбить на три участка, первый из которых характеризуется убыванием интенсивности уменьшения высоты сжатой зоны $h_c(n)$; за ним следует участок постоянной скорости уменьшения $h_c(n)$. С дальнейшим увеличением количества циклов нагружений интенсивность уменьшения высоты сжатой зоны возрастает, достигая своего минимального значения (3-й участок).

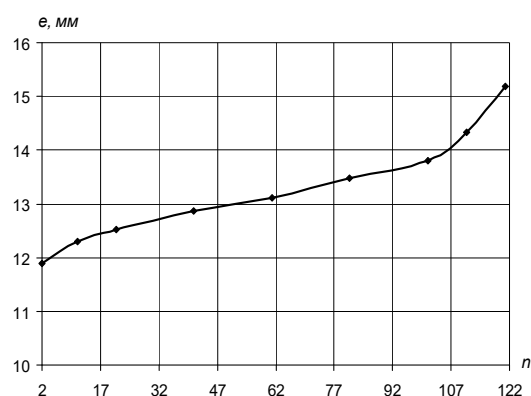


Рисунок 3 — График изменения начального эксцентриситета стоек серии С-III в зависимости от количества циклов нагружений

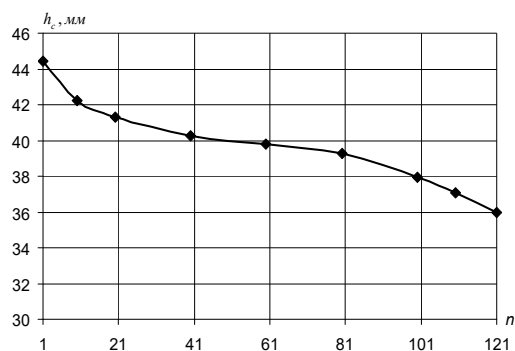


Рисунок 4 — График изменения высоты сжатой зоны стойки С-III-1 в зависимости от количества циклов

Таким образом, разрушению стоек серии С-III предшествовало резкое увеличение скорости деформирования и уменьшение высоты сжатой зоны $h_c(n)$, вследствие чего стойки в течение долей секунды исчерпывали прочность и разрушались. Сказанное иллюстрируется рисунками 1–4.

Выводы и направление дальнейших исследований. В железобетонных внецентренно сжатых элементах при немногократно повторных нагружениях бетон последовательно проходит три стадии упругопластического деформирования. Стабилизация роста деформаций бетона и прогибов стоек (приспособляемость) наступает после 5–10 циклов, что может являться

критерием для назначения количества циклов в условиях малоцикловых нагружений. Несущая способность и характер разрушения внецентренно сжатых элементов зависят от особенностей деформирования бетона при подобном характере нагружений.

В настоящее время в нормативных документах отсутствует методика расчета строительных конструкций в условиях малоцикловых нагружений. В связи с этим назрела необходимость создания единой методики расчета, учитывающей особенности изменения физико-механических свойств бетона и арматурной стали в зависимости от условий эксплуатации конструкций.

Библиографический список

1. Подобенко Т. Н. *Напряженно-деформированное состояние железобетонных изгибаемых элементов при кратковременных повторных нагружениях* : автореф. дис. ... канд. техн. наук. К. : НИИСК, 1991. 17 с.
2. *Результаты экспериментальных исследований влияния немногократно повторных нагружений на несущую способность внецентренно сжатых стоек* / Карапетян С. Х. [и др.] // Будівельні конструкції : зб. наук. праць. К. : НДБК, 2005. Т. 1. Вип. 62. С. 131–136.
3. Панчук Ю. Н., Крусъ Ю. А. *Напряженно-деформированное состояние бетона при малоцикловых статических нагружениях высоких уровней* // Совершенствование строительных материалов, технологий и методов расчета конструкций в новых экономических условиях : материалы международной научно-практической конференции. Сумы, 1994. С. 170–171.
4. Ставров, Г. Н., Руденко В. В., Федосеев А. А. *Прочность и деформативность бетона при повторно статических нагружениях* // Бетон и железобетон. 1985. № 1. С. 33–34.
5. Панчук Ю. М. *Робота згинальних залізобетонних елементів зі змішаним армуванням при високих рівнях малоциклового навантаження* : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Львів, 1991. 17 с.

© Карапетян С. Х.

© Емец Е. В., Псюк В. В.

Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. архитектурного дизайна и строительных конструкций ДонГТУ Бондарчуком В. В., к.т.н., доц. каф. строительства и архитектуры ЛГУ им. В. Даля Усенко В. Н.

Статья поступила в редакцию 26.05.2023.

PhD in Engineering Karapetyan S. Kh. (Lugansk State University named after V. Dahl, Lugansk, LPR, the Russian Federation, karapetyanskh@gmail.com), **PhD in Engineering Emets E. V.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, LPR, the Russian Federation, elena.emecz@yandex.ru), **PhD in Engineering Psiuk V. V.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, LPR, the Russian Federation, psuk@rambler.ru)

STRESS-STRAIN STATE OF CONCRETE IN REINFORCED BEAM COLUMNS UNDER LOW-CYCLE LOADS OF HIGH LEVELS

The article is devoted to experimental and theoretical studies of the work of concrete in reinforced concrete non-centrally compressed elements under repeated loads.

Key words: concrete, reinforced concrete, off-center compression, strength, deformations, low-cycle loads, number of loading cycles, stress-strain state.

References

1. Podobenko T. N. *Stress-strain state of reinforced concrete bending elements under short-term repeated loading: synopsis of a thesis of PhD in Engineering [Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie zhelezobetonnyh izgibaemykh elementov pri kratkovremennykh povtornykh nagruzheniyah: avtoref. dissert. kand. tekhn. nauk]*. K.: SRISR, 1991. 17 p. (rus)
2. Karapetian S. Kh., Davidenko A. I., Ivanov A. P., Psiuk V. V. *The results of experimental studies of the effect of infrequently repeated loading on the bearing capacity of beam columns [Rezultaty eksperimental'nykh issledovaniy vliyaniya nemnogokratno povtornykh nagruzhenij na nesushchuyu sposobnost' vnecentrenno szhatykh stoek]*. Building structures: scientific works collection. K.: SRIBC, 2005. Iss. 62. Vol. I. Pp.131–136. (rus)
3. Panchuk Yu. N., Krus' Yu. A. *Stress-strain state of concrete under low-cycle static loading of high levels [Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie betona pri malociklovykh staticheskikh nagruzheniyah vysokih urovnej]*. Sovershenstvovanie stroitel'nykh materialov, tekhnologij i metodov rascheta konstrukcij v novykh ekonomicheskikh usloviyah: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Sumy, 1994. Pp. 170–171. (rus)
4. Stavrov G. N., Rudenko V. V., Fedoseev A. A. *Strength and deformability of concrete under repeated static loading [Prochnost' i deformativnost' betona pri povtorno staticheskikh nagruzheniyah]*. Beton i zhelezobeton. 1985. No. 1. Pp. 33–34. (rus)
5. Panchuk Yu. M. *Operation of bending reinforced concrete elements with mixed reinforcement at high levels of low-cycle loading: synopsis of a thesis of PhD in Engineering [Robota zgin'al'nih zalizobetonnykh elementiv zi zmishanim armuvannyam pri vysokih rivnyah malociklovogo navantazhennya : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk]*. L'viv, 1991. 17 p. (ukr)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Карапетян Смбат Хачатурович, канд. техн. наук, доцент каф. строительства и архитектуры
Луганский государственный университет имени Владимира Даля
г. Луганск, Луганская Народная Республика, РФ,
e-mail: karapetyansk@gmail.com

Емец Елена Васильевна, канд. техн. наук, доцент каф. промышленного строительства
Донбасский государственный технический университет
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ,
e-mail: elena.emecz@yandex.ru

Псюк Виктор Васильевич, канд. техн. наук, доцент каф. промышленного строительства
Донбасский государственный технический университет
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ,
e-mail: psuk@rambler.ru