

УДК 624.071

© В. М. Попов, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: popov_vladimir_m@mail.ru

© М. Г. Плюснин, канд. техн. наук, доцент
(Костромская государственная сельскохозяйственная
академия, пос. Караваево, Костромская область, Россия)

E-mail: apraiser3@yandex.ru

© В. В. Белов, д-р техн. наук, доцент
(АО «Атомэнергoproект»,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: vvbelov@atomproekt.com

© С. Н. Савин, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: savinsn@gmail.com

© Е. В. Мерзлякова, директор
(ООО «Кальматрон-СПб», Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: newtech@kalmatron.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-6-23-30

© V. M. Popov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: popov_vladimir_m@mail.ru

© M. G. Plyusnin, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Kostroma State Agricultural Academy,
Karavaevo, Kostroma region, Russia)

E-mail: apraiser3@yandex.ru

© V. V. Belov, Dr. Sci. Tech., Associate Professor
(JSC «Atomenergoproekt»,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: vvbelov@atomproekt.com

© S. N. Savin, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: savinsn@gmail.com

© E. V. Merzliakova, Director
(LLC Kalmatron-SPb, St. Petersburg, Russia)

E-mail: newtech@kalmatron.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЦИКЛОВ ЗАМОРАЖИВАНИЯ И ОТТАИВАНИЯ

THE USE OF STEEL-FIBER CONCRETE TO STRENGTHEN BENDING REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER THE INFLUENCE OF FREEZING AND THAWING CYCLES

Проведены расчеты, показавшие эффективность использования высокопрочного и высокоподвижно-го ремонтного состава «Гидробетон Наливной-2» (производитель ООО «Кальматрон-СПб») для усиления железобетонных изгибаемых элементов, подвергшихся воздействию циклов замораживания и оттаивания. В качестве исходных данных использованы результаты экспериментальных исследований. В результате расчетов определено, что наибольший эффект достигается для балок с малым, близким к минимальному, и высоким (превышающим μ_r) процентом армирования.

Ключевые слова: нелинейная деформационная модель, изгибаемый железобетонный элемент, надежность железобетонных конструкций, сталефибробетон.

There have been carried out calculations that show the efficiency of using high-strength and highly mobile repair compound «Gidrobeton Nalivnoj-2» (manufactured by LLC «Kalmatron-SPb») to strengthen reinforced concrete bending elements exposed to freezing and thawing cycles. The results of experimental studies were used as initial data. As a result of calculations, it has been found out that the greatest effect is achieved for beams with a small, close to minimal, and high (exceeding μ_r) percentage of reinforcement.

Keywords: nonlinear deformation model, bending reinforced concrete element, reliability of reinforced concrete structures, steel fiber concrete.

Введение

В процессе эксплуатации несущие железобетонные конструкции зданий и сооружений подвергаются воздействию неблагоприятных факторов внешней среды, что приводит к снижению их несущей способности и необходимости усиления этих конструкций. На практике применяются различные методы усиления элементов железобетонных конструкций [1-8]. Одним из них является бетонная или железобетонная обойма (незамкнутая с одной стороны обойма называется рубашкой). Наиболее часто обоймы применяются при усилении железобетонных колонн [6-9], так как их применение для усиления изгибаемых элементов трудоемко и нерационально с конструктивной точки зрения. Однако данный способ усиления может быть эффективен для железобетонных балок, подвергающихся воздействию агрессивных к бетону факторов внешней среды, например, циклов замораживания и оттаивания. Более плотный материал рубашки затруднит проникновение влаги и агрессивных газов внутрь конструкции, что приведет к замедлению деструктивных процессов в материалах и, соответственно, увеличению сроков службы. Одним из перспективных материалов для усиления железобетонных конструкций является сталефибробетон, который, помимо высокой прочности, имеет большие предельные деформации и энергию разрушения, чем обычный тяжелый бетон [6-13]. В работе [14] приведены результаты исследования прочностных и деформационных характеристик сталефибробетонной смеси на основе высокопрочного и высокоподвижного ремонтного состава «Гидробетон Наливной-2» (производитель ООО «Кальматрон-СПб») и полученные в результате этих исследований полные диаграммы $\sigma - \epsilon$. Характеристики этой смеси (подвижность, высокая адгезия) позволяют использовать ее для изготовления рубашек при усилении железобетонных балок.

Задачей описываемого в настоящей работе исследования является оценка эффективности усиления изгибаемого железобетонного элемента при различных процентах армирования.

Материалы и методы

Объектом исследования является железобетонная балка с одиночным армированием, подвергнутая воздействию циклов замораживания и оттаивания (ЦЗО) и усиленная с помощью рубашки из сталефибробетонной смеси. Геометрические характеристики поперечного сечения балки показаны на рис. 1. Сечение балки 400×200 мм, бетон В30, арматура А500. Толщина рубашки из сталефибробетона 50 мм.

Несущая способность железобетонной балки определяется диаграммным методом с использованием его стандартных допущений, а также предположения об отсутствии проскальзывания между бетоном и сталефибробетонной рубашкой. Диаграмма бетона $\sigma - \epsilon$ после воздействия ЦЗО принята по результатам, приведенным в работе [15], диаграмма сталефибробетона — по данным [14] (рис. 2). Как видно по диаграммам на рис. 2, сталефибробетон по сравнению с бетоном после ЦЗО имеет бóльшую прочность и предельные деформации при сжатии, а также работает при растяжении.

Процент продольного армирования растянутой зоны μ_s варьируется в диапазоне 0,5–3,0 % с шагом 0,5 %.

Результаты

По результатам расчета построены зависимости абсолютного значения изгибающего момента от деформации крайнего сжатого волокна изгибаемого элемента до и после усиления (рис. 3).

Для всех рассмотренных случаев характерно увеличение жесткости и несущей способности балки после усиления сталефибробетоном. Характерной особенностью для всех процентов армирования, кроме $\mu = 0,5$ %, является увеличение деформа-

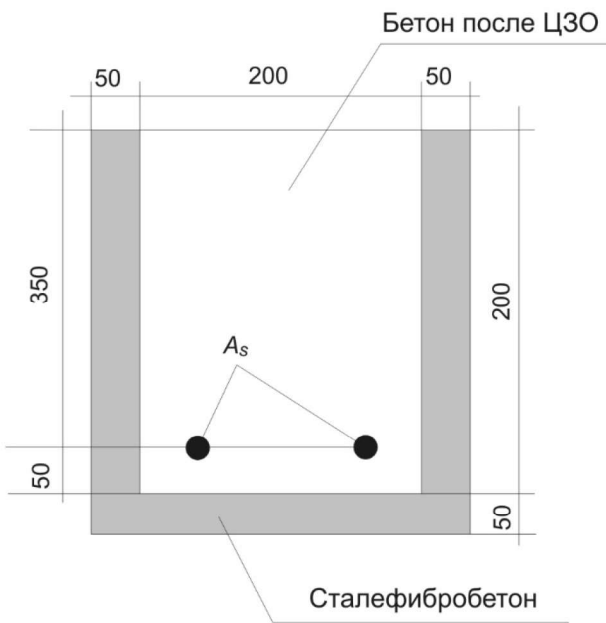


Рис. 1. Геометрические характеристики поперечного сечения усиленной железобетонной балки

ций, при которых изгибающий момент остается близким к максимальному. Это свидетельствует об изменении характера разрушения балки, который становится более энергоемким за счет работы сталефи-

бробетона. При $\mu = 0,5\%$ снижение несущей способности происходит при превышении предельных деформаций в растянутом сталефибробетоне (рис. 3, а). Зависимость максимального момента до и после усиления от процента армирования μ показана на рис. 4, а относительное увеличение несущей способности — на рис. 5. Максимальный эффект от усиления (159 %) достигается при $\mu = 0,5\%$, далее при $\mu = 0,5-2,0\%$ происходит его снижение до 128 % (рис. 5). С ростом процента армирования $\mu = 2,5-3,0\%$ относительная несущая способность увеличивается до 160 % при $\mu = 3,0\%$.

Зависимость прироста несущей способности от первоначального процента армирования балки можно объяснить следующим.

В случае $\mu = 0,5\%$ заметный вклад в увеличение несущей способности вносит усилие в растянутом сталефибробетоне, так как при малом проценте армирования его величина сравнима с усилием в растянутой арматуре (рис. 6). При этом напряжения в сжатом бетоне и сталефибробетоне не достигают расчетных значений.

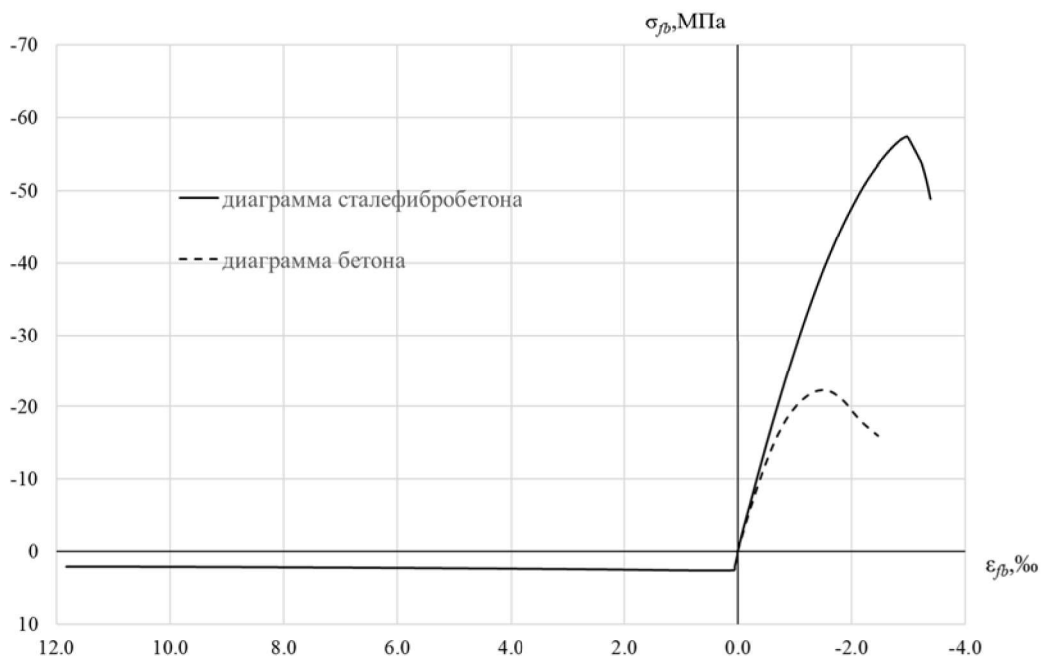


Рис. 2. Диаграммы $\sigma - \epsilon$ бетона после воздействия ЦЗО и ремонтной сталефибробетонной смеси

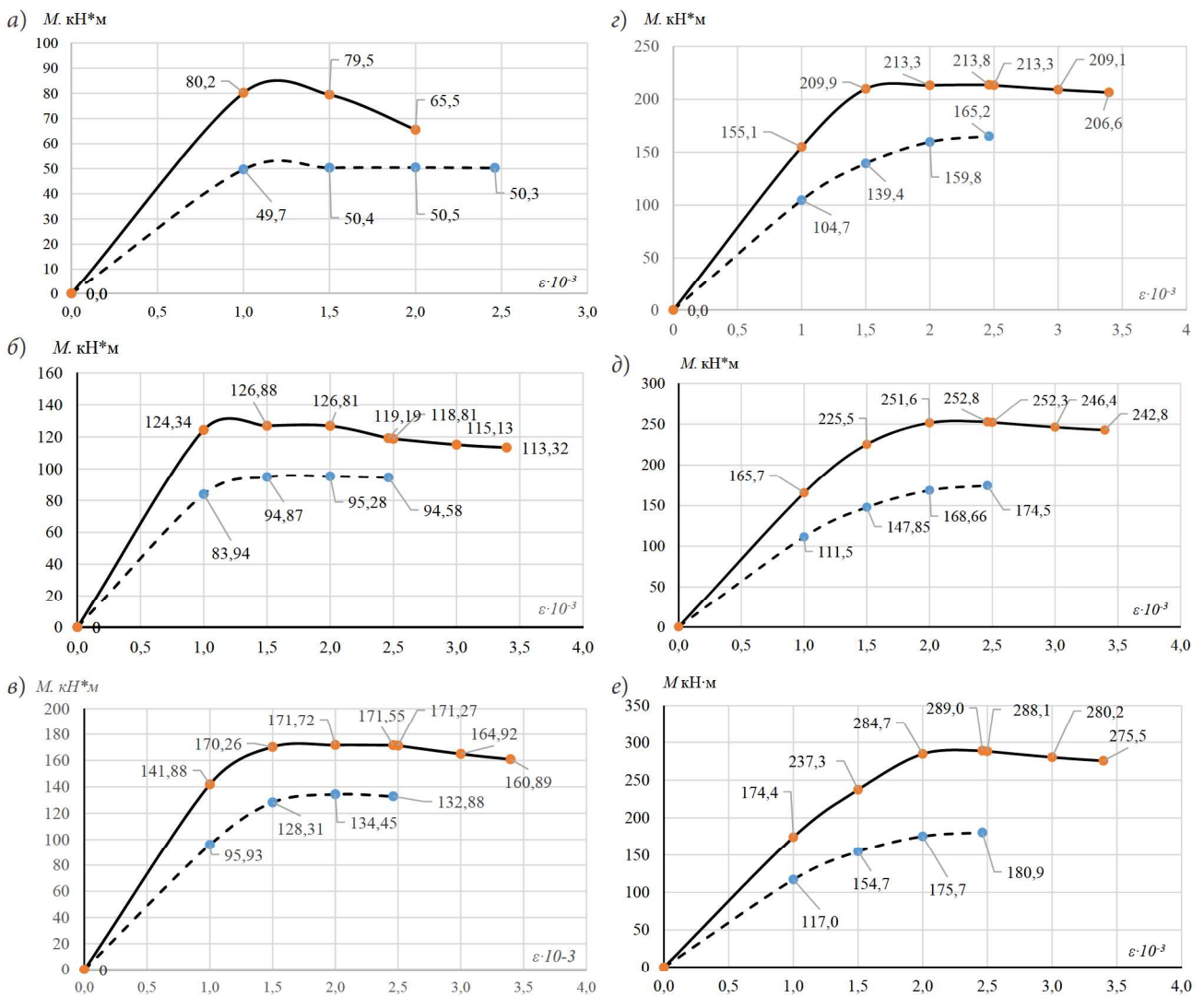


Рис. 3. Зависимость изгибающего момента железобетонного элемента от деформации крайнего сжатого волокна до (пунктир) и после (сплошная линия) усиления сталефибробетоном при μ , равном: а — 0,5 %; б — 1,0 %; в — 1,5 %; г — 2,0 %; д — 2,5 %; е — 3,0 %

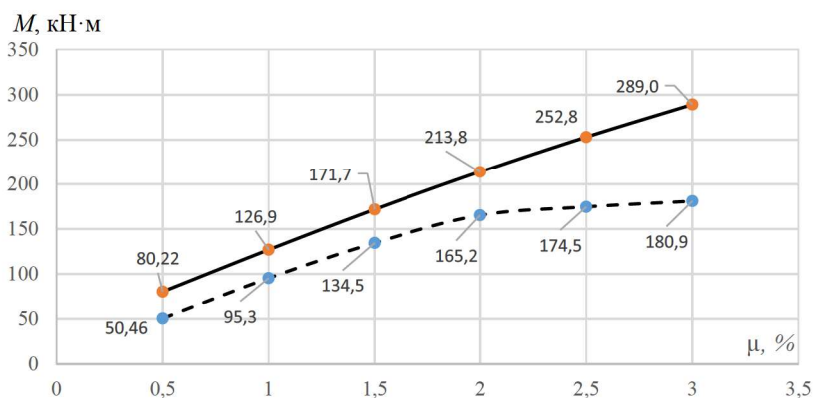


Рис. 4. Зависимость максимального изгибающего момента железобетонного элемента от процента армирования до (пунктир) и после (сплошная линия) усиления сталефибробетоном

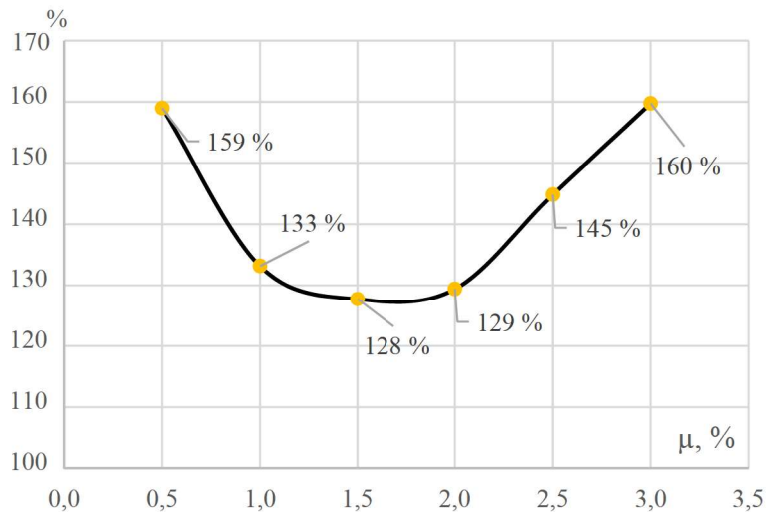


Рис. 5. Зависимость относительного увеличения несущей способности от процента армирования

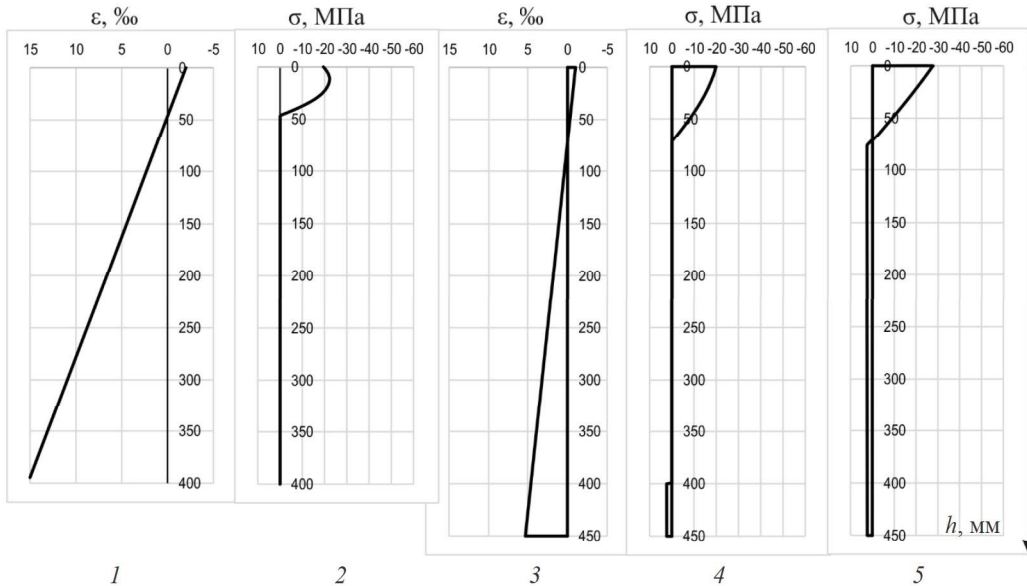


Рис. 6. Эпюры напряжений и деформаций в нормальном сечении балки, соответствующие максимальному значению момента, при $\mu = 0,5\%$: 1 — деформации до усиления; 2 — напряжения до усиления; 3 — деформации после усиления; 4 — напряжения в средней части балки; 5 — напряжения в боковой части балки (рубашка из сталефибробетона)

С ростом процента армирования доля усилия в растянутом сталефибробетоне в суммарном усилии в растянутой зоне балки снижается, что приводит к снижению прироста несущей способности усиленного элемента при $\mu = 1,0-2,0\%$. Дальнейшее увеличение процента армирования более $2,0\%$ ($\mu > \mu_R$) существенно повышает несущую способ-

ность балки. В этом случае увеличение усилия в сжатой зоне балки за счет сталефибробетона позволяет снизить значение высоты сжатой зоны и полностью использовать потенциал растянутой арматуры (рис. 7).

Выводы

Усиление железобетонных изгибаемых элементов, подвергнутых ЦЗО, при помощи

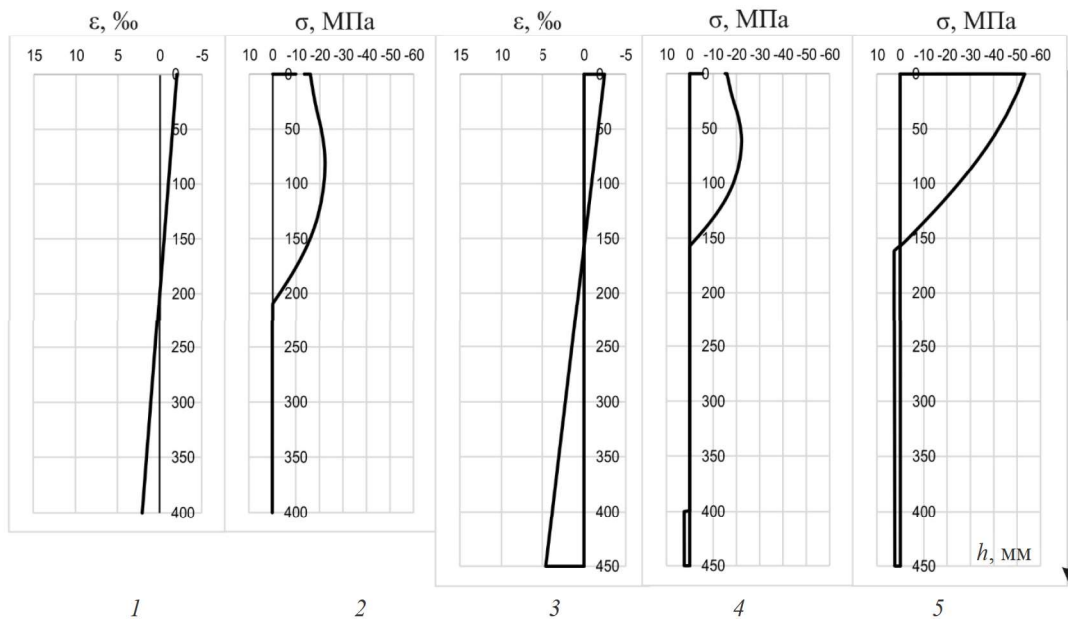


Рис. 7. Эпюры напряжений и деформаций в нормальном сечении балки, соответствующие максимальному значению момента, при $\mu = 3,0\%$: 1 — деформации до усиления; 2 — напряжения до усиления; 3 — деформации после усиления; 4 — напряжения в средней части балки; 5 — напряжения в боковой части балки (рубашка из сталефибробетона)

рубашки из сталефибробетона на основе ремонтного состава «Гидробетон Наливной-2» позволяет увеличить несущую способность на 30–60 %. Наибольший эффект достигается для балок с малым, близким к минимальному, и высоким (превышающим μ_R) процентом армирования.

Библиографический список

1. Беспаев А. А., Муханбетжанова Ж. Ш. Восстановление поврежденных железобетонных конструкций композитными пластиками // Труды университета. 2022. № 3 (88). С. 213–219. DOI 10.52209/1609-1825_2022_3_213. EDN EZHPIQ.
2. Гучкин И. С., Булавенко В. О. Усиление железобетонной балки стальной затяжкой, накладками и фиброармированным пластиком // Региональная архитектура и строительство. 2012. № 1 (12). С. 69–74. EDN OORAUT.
3. Денисова А. Д. Расчет усиления обжатия при проектировании усиления железобетонных конструкций внешним армированием с предварительным напряжением // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 5 (82). С. 59–65.
4. Денисова А. Д., Шеховцов А. С., Кужман Е. Д. Влияние ширины композиционного материала, при-

меняемого при усилении железобетонных конструкций, на его работу при растяжении // Строительные материалы. 2022. № 11. С. 26–31.

5. Молодин В. В., Леонович С. Н. Сцепление бетона восстановления с коррозионно-деструктурированной железобетонной конструкцией // Наука и техника. 2022. Т. 21, № 1. С. 36–41. DOI 10.21122/2227-1031-2022-21-1-36-41. EDN OGZJFD.

6. Уткин Д. Г., Анпилогова В. А. Усиление несущих железобетонных конструкций с применением фибробетона // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы Междунар. академических чтений. Курск, 18 ноября 2021 г. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2021. С. 249–254. EDN TWCXTQ.

7. Поднебесов П. Г., Теряник В. В. Испытания внецентренно сжатых железобетонных элементов, усиленных обоймами с использованием самоуплотняющегося сталефибробетона // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Т. 16. № 1. С. 5–11. DOI 10.14529/build160101. EDN VNXQQF.

8. Сикорская О. В., Хегай А. О. Сравнение эффективности усиления внецентренно сжатых железобетонных колонн при помощи сталефибробетона и железобетона методом двустороннего наращивания // Вопросы науки и образования. 2018. № 8 (20). С. 24–29. EDN QQXBNR.

9. Камалова К. Д. Исследование усиления фибробетонном узлов монолитных железобетонных рамно-стержневых систем многоэтажных зданий при аварийных воздействиях // Научный электронный журнал «Меридиан». 2020. № 3 (37). С. 465–467. EDN WJLLDO.

10. Вахмистров А. И., Морозов В. И., Пухаренко Ю. В., Стерин В. С. Эффективность применения фибробетона в конструкциях при динамических воздействиях // Вестник гражданских инженеров. 2006. № 4 (9). С. 130–134. EDN JWQSYR.

11. Тоцкий О. Н. Ремонт железобетона фибробетонном // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2006. № 2. С. 80–83. EDN JSISRJ.

12. Морозов В. И., Опбул Э. К., Калдар-Оол А.-Х. Б. Сталефиброжелезобетонные конструкции в условиях сложных деформаций // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 3 (92). С. 21–27. DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-3-21-27. EDN NJPBMN.

13. Морозов В. И., Опбул Э. К. Расчет изгибаемых сталефиброжелезобетонных элементов по нелинейной деформационной модели с использованием опытных диаграмм деформирования сталефибробетона // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 5 (58). С. 51–55. EDN XGRIEB.

14. Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Исследование деформационных и прочностных характеристик ремонтного материала наливного типа „ГИДРОБЕТОН НАЛИВНОЙ-2“ с дисперсным армированием стальной фиброй применительно к усилению железобетонных конструкций в условиях силовых и средовых воздействий (замораживание и оттаивание)» (заключительный). Шифр № 3-01-1/21/67 / Науч. рук. В. И. Морозов; исп. В. М. Попов, В. В. Кондратюк.

15. Попов В. М., Плюснин М. Г. Экспериментальное исследование диаграмм $\sigma - \epsilon$ бетона при одноосном сжатии и влияния на их форму циклов замораживания и оттаивания // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4 (81). С. 80–88. DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-4-80-88. EDN BUUCVB.

References

1. Bespaev A. A., Mukhanbetzhanova Zh. Sh. Vosstanovlenie povrezhdennykh zhelezobetonnykh konstruktсий kompozitnymi plastikami [Restoration of damaged reinforced concrete structures with composite plastics]. *Trudy universiteta – Proceedings of the University*, 2022, no. 3 (88), pp. 213–219. DOI 10.52209/1609-1825_2022_3_213. EDN EZHPIQ.

2. Guchkin I. S., Bulavenko V. O. Usilenie zhelezobetonnoy balki stal'noy zatyazhkoy, nakladkami i fibroarmirovannym plastikom [Reinforcement of

reinforced concrete beam with steel fastener, overlays and fiber reinforced plastic]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo – Regional Architecture and Construction*, 2012, no. 1 (12), pp. 69–74. EDN OORAUT.

3. Denisova A. D. Raschet usileniya obzhatiya pri proektirovanii usileniya zhelezobetonnykh konstruktсий vneshnim armirovaniem s predvaritel'nym napryazheniem [Calculation of compression reinforcement in the design of reinforcement of reinforced concrete structures by external reinforcement with pre-stressing]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 5 (82), pp. 59–65.

4. Denisova A. D., Shekhovtsov A. S., Kuzhman E. D. Vliyanie shiriny kompozitsionnogo materiala, primenyaemogo pri usilenii zhelezobetonnykh konstruktсий, na ego rabotu pri rastyazhenii [Effect of composite material width used in reinforcement of reinforced concrete structures on its tensile performance]. *Stroitel'nye materialy – Building Materials*, 2022, no. 11, pp. 26–31.

5. Molodin V. B., Leonovich S. N. Stseplenie betona vosstanovleniya s korrozionno-destruktirovannoy zhelezobetonnoy konstruktсией [Cohesion of restoration concrete with corrosion-damaged reinforced concrete structure]. *Nauka i tekhnika – Science and Technology*, 2022, vol. 21, no. 1, pp. 36–41. DOI 10.21122/2227-1031-2022-21-1-36-41. EDN OGGZFD.

6. Utkin D. G., Anpilogova V. A. Usilenie nesushchikh zhelezobetonnykh konstruktсий s primeneniem fibrobetona. Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii [Strengthening of bearing reinforced concrete structures with application of fiber reinforced concrete. Safety provision of building fund of Russia]. *Trudy Mezhdunar. akademicheskikh chteniy. Kursk, 18 noyabrya 2021 g. «Problemy i resheniya»* [Proceedings of the academic readings. Kursk, November 18, 2021 “Problems and solutions”]. Kursk: Universitetskaya kniga Publ., 2021, pp. 249–254. EDN TWCXTQ.

7. Podnebesov P. G., Teryanik V. V. Ispytaniya vnetsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov, usilennykh oboymami s ispol'zovaniem samouplotnyayushchegosya stalefibrobetona [Testing of eccentrically compressed reinforced concrete elements reinforced with self-compacting steel-fiber concrete]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gos. un-ta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura – Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and Architecture*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 5–11. DOI 10.14529/build160101. EDN VNXQQF.

8. Sikorskaya O. V., Kheday A. O. Sravnenie effektivnosti usileniya vnetsentrennoszhatykh zhelezobetonnykh kolonn pri pomoshchi stalefibrobetona i zhelezobetona metodom dvustoronnego narashchivaniya [Comparison of reinforcement efficiency of eccentrically compressed reinforced concrete columns using steel fiber concrete

and reinforced concrete by the method of two-way reinforcement]. *Voprosy nauki i obrazovaniya – Issues of Science and Education*, 2018, no. 8 (20), pp. 24–29. EDN XQXBNR.

9. Kamalova K. D. *Issledovanie usileniya fibrobetonom uzlov monolitnykh zhelezobetonnykh ramno-sterzhnevyykh sistem mnogoetazhnykh zdaniy pri avariynnykh vozdeystviyakh* [Investigation of fiber reinforced concrete reinforcement of monolithic reinforced concrete nodes of monolithic reinforced concrete frame and rod systems of multistorey buildings under emergency impacts]. *Nauchniy elektronniy zhurnal «Meridian» – Scientific electronic journal “Meridian”*, 2020, no. 3 (37), pp. 465–467. EDN WJLLDO.

10. Vakhmistrov A. I., Morozov V. I., Pukhareno Yu. V., Sterin V. S. *Effektivnost' primeneniya fibrobetona v konstruktivnykh pri dinamicheskikh vozdeystviyakh* [Efficiency of application of fiber reinforced concrete in structures under dynamic impacts]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2006, no. 4 (9), pp. 130–134. EDN JWQSYF.

11. Totskiy O. N. *Remont zhelezobetona fibrobetonom* [Repair of reinforced concrete with fiber concrete]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktiv i sooruzheniy – Construction mechanics of engineering constructions and structures*, 2006, no. 2, pp. 80–83. EDN JSISRJ.

12. Morozov V. I., Opubl E. K., Kaldar-Ool A.-Kh. B. *Stalefibrozhelezobetonnye konstruktiv v usloviyakh slozhnykh deformatsiy* [Steel-fiber-reinforced concrete structures under conditions of complex deformations]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2022, no. 3 (92), pp. 21–27. DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-3-21-27. EDN NJPBMN.

13. Morozov V. I., Opubl E. K. *Raschet izgibaemykh stalefibrozhelezobetonnykh elementov po nelineynoy deformatsionnoy modeli s ispol'zovaniem opytnykh diagramm deformirovaniya stalefibrobetona* [Calculation of flexural steel-fiber-reinforced concrete elements by nonlinear deformation model using experimental steel-fiber-reinforced concrete deformation diagrams]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. (58), pp. 51–55. EDN XGRIEB.

14. Popov V. M., Kondratyuk V. V. (Scientific Supervisor Morozov V. I.) *Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote po teme «Issledovanie deformatsionnykh i prochnostnykh kharakteristik remontnogo materiala nalivnogo tipa „GIDROBETON NALIVNOY-2“ s dispersnym armirovaniem stal'noy fibroy primenitel'no k usileniyu zhelezobetonnykh konstruktiv v usloviyakh silovykh i sredovykh vozdeystviy (zamorazhivanie i ottaivanie)» (zaklyuchitel'niy)* [Report on research work on the topic “Study of deformation and strength characteristics of the repair material of pouring type “HYDROBETON NALIVNOY-2” with dispersed reinforcement with steel fiber as applied to reinforcement of reinforced concrete structures under conditions of force and environmental effects (freezing and thawing)” (final)]. No. 3-01-1/21/67.

15. Popov V. M., Plyusnin M. G. *Eksperimental'noe issledovanie diagramm $\sigma - \epsilon$ betona pri odnoosnom szhatii i vliyaniya na ikh formu tsiklov zamorazhivaniya i ottaivaniya* [Experimental study of $\sigma - \epsilon$ diagrams of concrete under uniaxial compression and the influence of freezing and thawing cycles on their shape]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 4 (81), pp. 80–88. DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-4-80-88. EDN BUUCVB.