

Оценка эффективности композитного усиления железобетонных конструкций в управлении жизненным циклом объектов строительства

Б.И. Пинус¹, Н.А. Тоцкий², А.М. Дилбарян³✉, Н.А. Слободчикова⁴

¹⁻⁴Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Управление жизненным циклом объектов строительства на этапе эксплуатации требует обоснованного выбора организационно-технических решений, направленных на восстановление эксплуатационной надежности конструкций, продление срока их службы и рациональное использование ресурсов. Цель исследования заключается в оценке эффективности композитного усиления железобетонных конструкций как инструмента управления техническим состоянием объектов строительства. Исследование выполнено методом сравнительных испытаний бетонных балочных образцов класса В25 без усиления и с внешним армированием углепластиковым холстом SikaWrap® 530 C(VP), закрепленным эпоксидным составом Sikadur®-300. Эффективность усиления оценивалась по совокупности критериев: максимальной и разрушающей нагрузкам, предельным деформациям, продолжительности сопротивления разрушению и энергетическим показателям деформирования. Установлено, что углепластиковое усиление повышает максимальную несущую способность элементов в 2,7 раза, предельные деформации – приблизительно в 3 раза, продолжительность сопротивления разрушению – в 6,35 раза, а энергетические показатели внутреннего сопротивления – приблизительно в 7 раз. Полученные результаты подтверждают возможность применения внешнего углепластикового армирования при разработке решений по ремонту, восстановлению и модернизации железобетонных конструкций. Экспериментальные данные могут использоваться для оценки эффективности, качества и надежности вариантов усиления, а также для поддержки принятия организационно-технических решений при формировании программ эксплуатации, капитального ремонта и продления жизненного цикла объектов строительства.

Ключевые слова: строительные системы, надежность, железобетонные конструкции, композитное усиление, жизненный цикл, этапы, остаточный ресурс, ремонтпригодность, организационно-технические решения

Для цитирования: Пинус Б.И., Тоцкий Н.А., Дилбарян А.М., Слободчикова Н.А. Оценка эффективности композитного усиления железобетонных конструкций в управлении жизненным циклом объектов строительства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2026. Т. 16. № 2. С. 379–386. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2026-2-379-386>. EDN: MAAJPU.

Original article

Evaluation of the effectiveness of composite reinforcement of reinforced concrete structures in managing the life cycle of construction facilities

Boris I. Pinus¹, Nikita A. Totskiy²,
Arutyun M. Dilbaryan³✉, Nadezhda A. Slobodchikova⁴

¹⁻⁴Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Life cycle management of construction facilities at the operational stage requires a reasonable choice of organizational and technical solutions aimed at restoring operational reliability of structures, extending their service life and rational use of resources. The purpose of the study is to evaluate the effectiveness of composite reinforcement of reinforced concrete structures as a tool for managing the technical condition of construction facilities. The study was performed by comparative testing of concrete

base samples of class B25 without reinforcement and with external reinforcement with carbon fiber alloy SikaWrap® 530 C(VP), fixed with epoxy compound Sikadur®-300. The effectiveness of reinforcement was assessed according to a set of criteria: maximum and destructive loads, limiting deformations, duration of fracture resistance and energy parameters of deformation. It has been found that carbon fiber reinforcement increases the maximum bearing capacity of the elements by 2.7 times, the maximum deformations by about 3 times, the duration of fracture resistance by 6.35 times, and the energy parameters of internal resistance by about 7 times. The results obtained confirm the possibility of using external carbon fiber reinforcement in the development of solutions for the repair, restoration and modernization of reinforced concrete structures. The experimental data can be used to assess the effectiveness, quality, and reliability of reinforcement options, as well as to support organizational and technical decision-making when forming programs for the operation, overhaul, and life cycle extension of construction facilities.

Keywords: building systems, reliability, reinforced concrete structures, composite reinforcement, life cycle, stages, residual resource, maintainability, organizational and technical solutions

For citation: Pinus B.I., Totskiy N.A., Dilbaryan A.M., Slobodchikova N.A. Evaluation of the effectiveness of composite reinforcement of reinforced concrete structures in managing the life cycle of construction facilities. *Proceedings of universities. Investment. Construction. Real estate*. 2026;16(2):379-386. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2026-2-379-386>. EDN: MAAJPU.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатационная надежность зданий и сооружений как способность сохранять требуемое техническое состояние в течение нормативного и сверхнормативного срока службы должна рассматриваться не только с позиции несущей способности отдельных конструкций, но и как элемент управления жизненным циклом объекта капитального строительства.

В этих условиях выбор способов усиления и восстановления приобретает значение организационно-технического решения, влияющего на продолжительность безопасной эксплуатации, величину межремонтных интервалов, ремонтпригодность и совокупные затраты на поддержание объекта в работоспособном состоянии [1, 2]. На этапе эксплуатации значительная часть решений по ремонту, модернизации и капитальному ремонту должна оцениваться не только по локальному приросту несущей способности, но и по влиянию на ресурс, экологические показатели, стоимость жизненного цикла и технологические ограничения производства работ [3–6].

Современные вызовы включают физический износ конструкций, необходимость адаптации зданий и сооружений к изменяющимся условиям эксплуатации, повышение требований к надежности и ограничение доступности материальных и временных ресурсов. Поэтому разработка технологически приемлемых способов усиления бетонных и железобетонных элементов является актуальной задачей, связанной с поддержкой принятия организационно-технических решений в системе управления жизненным циклом объектов строительства. В настоящей статье рассматривается

один из инструментов управления этапом эксплуатации объектов строительства – усиление бетонных и железобетонных элементов путем поверхностной наклейки углепластиковых холстов. Внешнее армирование композитными материалами рассматривается в современных исследованиях как эффективный способ повышения несущей способности, трещиностойкости и деформационной устойчивости железобетонных элементов [7–10]. Цель исследования состоит в оценке технической целесообразности данного решения не только с точки зрения прироста прочности, но и с позиции его применения для продления срока службы конструкций, повышения ремонтпригодности и обоснования мероприятий по восстановлению эксплуатационной пригодности объекта без существенного увеличения сроков и трудоемкости ремонтных работ.

МЕТОДЫ

Эффективность усиления железобетонных конструкций посредством поверхностной наклейки углепластиковых материалов оценивалась сопоставлением параметров внутреннего сопротивления балочек размером 400×100×100 мм двух серий.

Полученные экспериментальные данные рассматривались как основа для оценки применимости композитного усиления при принятии организационно-технических решений на этапе эксплуатации объекта, включая выбор способа восстановления несущей способности, прогноз изменения технического состояния и обоснование продления срока службы конструктивных элементов [11–15]. Выбор геометрии образцов обусловлен необходимостью моделирования работы изгибаемых бетонных

и железобетонных элементов. Состав бетонной смеси принят для класса В25, характерного для массового строительства зданий и сооружений:

- «Э» – эталонные образцы, изготовленные из бетона состава Ц:П:Щ:В = 1:1,75:2,9:0,45;
- «У» – образцы из бетона аналогичного состава, усиленные наклейкой холста из углеродных волокон шириной 100 мм (табл. 1).

Технология усиления включала три ключевых этапа:

1. Подготовка поверхности – механическая обработка и обезжиривание.
2. Нанесение клеевого состава – двухкомпонентная эпоксидная смола Sikadur®-300.
3. Наклейка холста – углепластиковый холст SikaWrap® 530 C(VP) с перекрытием 100 мм.

Таблица 1. Технические параметры элементов усиления

Table 1. Technical parameters of strengthening components

№ п.п.	Наименование показателей	Нормативные значения волокон холста из углеродных волокон SikaWrap® 530 C(VP)	Нормативные значения двухкомпонентного эпоксидного клея Sikadur®-300
1	Прочность на растяжение, МПа	4000	45
2	Модуль упругости при растяжении, МПа	240 000	3500
3	Удлинение при разрыве, %	1,5	1,5

Испытательный комплекс Instron 5989 обеспечивал регистрацию основных параметров деформирования и разрушения образцов:

1. Использовалась система цифровой корреляции изображений (DIC) для контроля деформаций.

2. Выполнялся акустико-эмиссионный мониторинг процесса разрушения.

Испытание образцов проводилось в возрасте 378 суток в нормальных условиях твердения посредством приложения сосредоточенной нагрузки в середине пролета. Выдержка образцов обеспечила завершение основных усадочных процессов и стабилизацию структурных характеристик бетона. Испытательный комплекс Instron 5989 позволял вести в автоматическом режиме:

- скорость нагружения 0,01 мм/с;
- непрерывную запись усилий, диаграмм деформирования и времени разрушения образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Общее количество испытанных образцов составило 13 штук, что позволяет выполнить сопоставление средних значений параметров сопротивления по сериям (табл. 2).

Установлено кратное возрастание основных параметров сопротивления усиленного бетона с преимущественным увеличением деформационного потенциала на восходящем этапе нагружения. Особое значение имеет показатель времени сопротивления до полного разрушения – его увеличение объясняется включением в работу внешнего композитного

слоя и перераспределением напряжений в системе «бетон–клеевой слой–углепластиковый холст». Опытные кривые σ – ε (рис. 1) и характер разрушения образцов (рис. 2) подтверждают эффективность принятого решения.

Где N_{max} – максимальное усилие; N_{ult} – усилие разрушения; ε_{max} – деформация при N_{max} ; ε_{ult} – деформация при N_{ult} ; $t_{разрушения}$ – время разрушения; δ – смещение плит.

За разрушение принималось снижение нагрузки на 15 % относительно достигнутого уровня нагружения.

Существенно отличается и постпиковый этап поведения материалов – у обычного бетона он практически отсутствует, тогда как у усиленных образцов сохраняется резерв сопротивления на уровне около 15 %. Это свидетельствует о развитии псевдопластических деформаций и снижении вероятности внезапного хрупкого разрушения.

Высокая эффективность композитного усиления подтверждается энергетическими показателями внутреннего сопротивления. Сравнительная оценка по площади диаграмм деформирования показывает примерно семикратное возрастание, что согласуется с затратами энергии нагрузочного устройства (табл. 3).

С позиции управления жизненным циклом это означает, что технология может рассматриваться как вариант восстановления эксплуатационной надежности при меньшей массе дополнительного усиления и меньших технологических ограничениях по сравнению с традиционными способами ремонта [3–6].

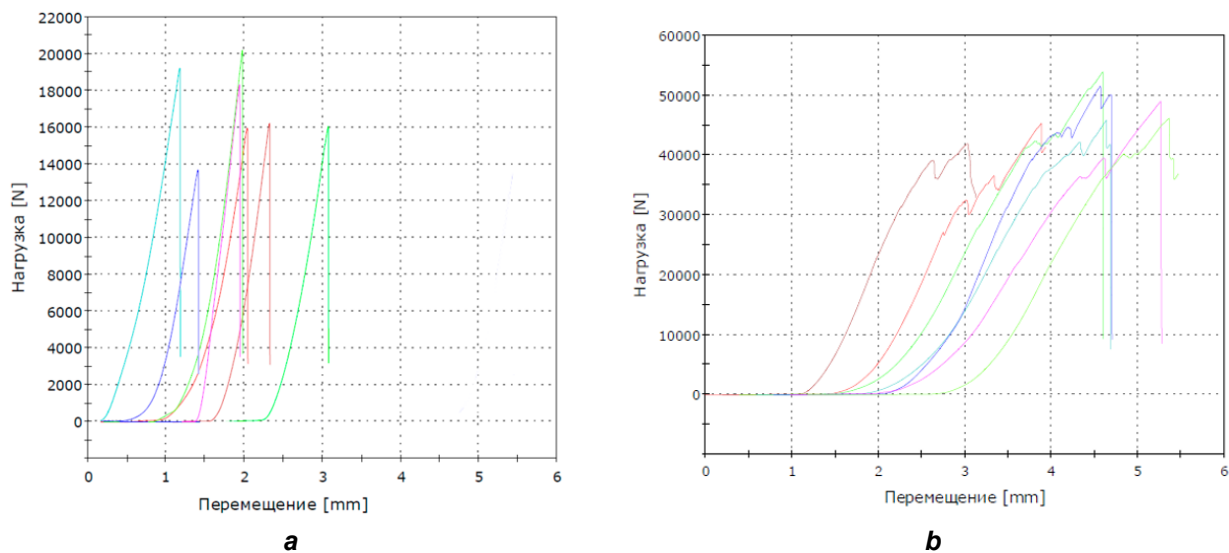


Рис. 1. Диаграммы деформирования обычных (а) и усиленных (б) балочек
Fig. 1. Deformation diagrams of reference (a) and strengthened (b) beam specimens

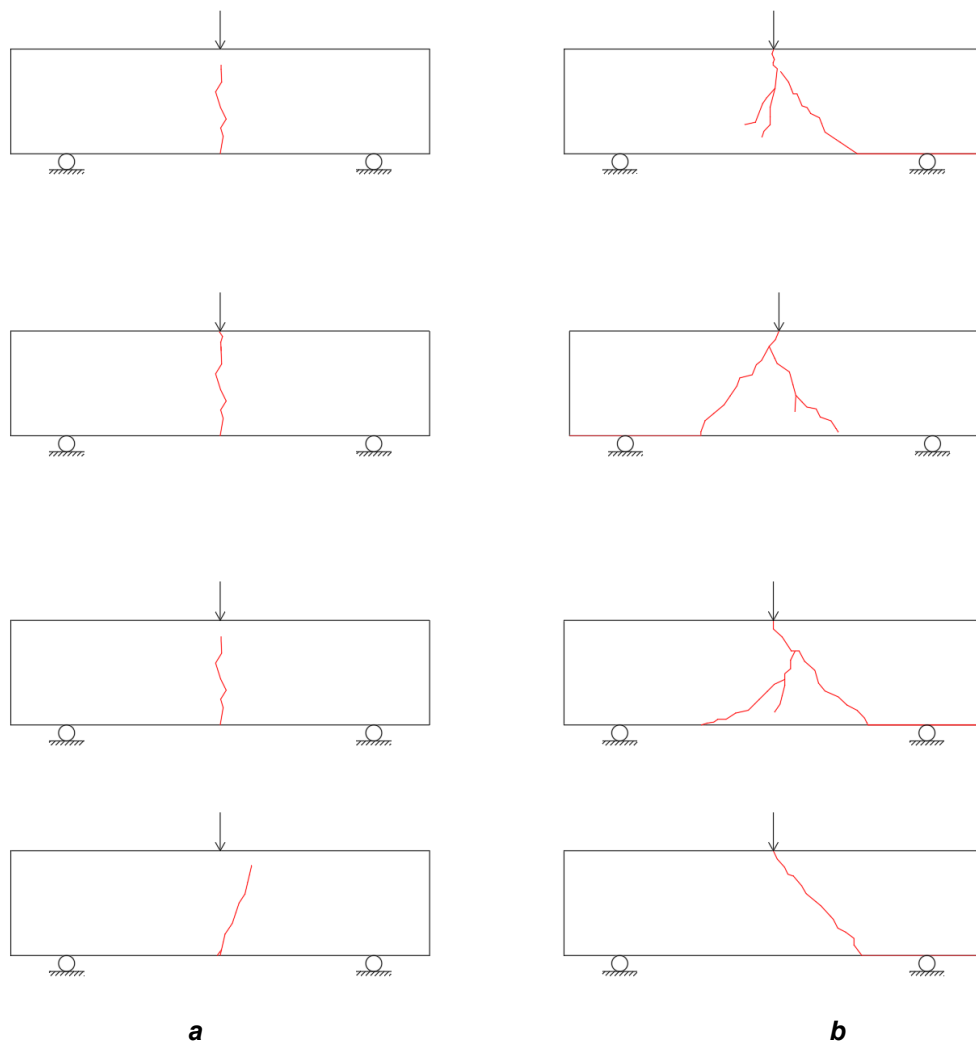


Рис. 2. Характер разрушения «Э» (а) и «У» (б) балочек
Fig. 2. Failure pattern of reference (a) and strengthened (b) beam specimens

Таблица 2. Экспериментальные значения параметров внутреннего сопротивления при изгибе
Table 2. Experimental values of internal resistance parameters in bending

Показатель	Размерность	Серия		У/Э
		«Э»	«У»	
$N_{\max}$	Н	17 562	48 057	2,7
N_{ult}	Н	17 411	42 198	2,42
$\varepsilon_{\max}$	мм	0,85	2,55	3
ε_{ult}	мм	0,83	2,53	2,98
$t_{\text{разрушения}}$	сек	34,3	257,5	6,35
δ	мм	1,05	2,67	2,54

Таблица 3. Экспериментальные значения энергетических параметров внутреннего сопротивления

Table 3. Experimental values of energy parameters of internal resistance

Серия	Площади эпюр (S) призм		Затраты нагрузочных устройств		
	$N_{\max}$	N_{ult}	N, Н	Δ , мм	$N \cdot \Delta$
Э	9,34	9,2	17 516	1,05	18 416
У	64,8	56,5	48 027	2,67	12 8370

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать следующие выводы:

1. Результаты экспериментов подтверждают, что композитное усиление бетонных и железобетонных элементов может рассматриваться не только как локальный конструктивный прием, но и как эффективный инструмент управления жизненным циклом объектов строительства на этапе эксплуатации.

Применение углепластиковых холстов обеспечивает повышение несущей способности, трещиностойкости и деформационной устойчивости элементов, что создает предпосылки для продления срока их безопасной эксплуатации.

2. С практической точки зрения исследуемая технология представляет интерес для

обоснования организационно-технических решений при ремонте, восстановлении и модернизации конструкций действующих объектов. Ее применение позволяет сократить продолжительность ремонтно-восстановительных работ, уменьшить технологические ограничения при производстве работ и снизить совокупные эксплуатационные затраты за счет увеличения межремонтных интервалов.

3. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка подходов к прогнозированию остаточного ресурса усиленных элементов, оценке их поведения в условиях переменных эксплуатационных воздействий и формированию критериев выбора композитного усиления в составе программ эксплуатации, капитального ремонта и продления жизненного цикла объектов строительства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Terekhov I.A., Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D. Mechanical Safety of Reinforced Concrete Structures at All Stages of the Life Cycle // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 410. P. 1–9. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341002012>.
2. Смоляго Г.А., Демин В.О., Фролов Н.В., Дрокин С.В. Оценка остаточного срока службы железобетонных перекрытий с коррозионными повреждениями // Строительство и архитектура. 2023. Т. 11. № 3. С. 1–17. <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2023-11-3-17-17>. EDN: FVRYOY.
3. Sbahieh S., McKay G., Al-Ghamdi S.G. A Comparative Life Cycle Assessment of Fiber-Reinforced Polymers as a Sustainable Reinforcement Option in Concrete Beams // Frontiers in Built Environment. 2023. Vol. 9. P. 1–15. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1194121>.
4. Palacios-Muñoz B., Gracia-Villa L., Zabalza-Bribián I., López-Mesa B. Simplified Structural Design and LCA of Reinforced Concrete Beams Strengthening Techniques // Engineering Structures. 2018. Vol. 174. P. 418–432. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.070>.

5. Pedroso P.F., Correia J.R., Silvestre J.D., Firmo J.P., Garrido M. Environmental and Economic LCA Comparison of Flexural Strengthening Solutions for a Reinforced Concrete Beam // *Materials*. 2024. Vol. 17. Iss. 23. P. 1–19. <https://doi.org/10.3390/ma17235879>.
6. Maxineasa S.G., Taranu N. Life Cycle Analysis of Strengthening Concrete Beams with FRP // *Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures*. 2018. P. 673–721. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102181-1.00024-1>.
7. Jahami A., Issa C.A. An Updated Review on the Effect of CFRP on Flexural Performance of Reinforced Concrete Beams // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2024. Vol. 18. P. 1–24. <https://doi.org/10.1186/s40069-023-00651-y>.
8. Teng J.G., Chen J.F., Smith S.T., Lam L., Chen J.-F. *FRP-Strengthened RC Structures*. Chichester: John Wiley & Sons, 2002. 266 p.
9. Triantafillou T.C., Antonopoulos C.P. Design of Concrete Flexural Members Strengthened in Shear with FRP // *Journal of Composites for Construction*. 2000. Vol. 4. Iss. 4. P. 198–205. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2000\)4:4\(198\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2000)4:4(198)).
10. De Lorenzis L., Teng J.G. Near-Surface Mounted FRP Reinforcement: an Emerging Technique for Strengthening Structures // *Composites Part B: Engineering*. 2007. Vol. 38. Iss. 2. P. 119–143. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.08.003>.
11. Issa C.A., AbouJouadeh A. Carbon Fiber Reinforced Polymer Strengthening of Reinforced Concrete Beams: Experimental Study // *Journal of Architectural Engineering*. 2004. Vol. 10. Iss. 4. P. 121–125. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0431\(2004\)10:4\(121\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0431(2004)10:4(121)).
12. Toutanji H., Zhao L., Zhang Y. Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Externally Strengthened with CFRP Sheets Bonded with an Inorganic Matrix // *Engineering Structures*. 2006. Vol. 28. Iss. 4. P. 557–566. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.09.011>.
13. Параничева Н.В., Назмеева Т.В. Усиление строительных конструкций с помощью углеродных композиционных материалов // *Инженерно-строительный журнал*. 2010. № 2. С. 19–22. EDN: MZJCWT.
14. Бадалова Е.Н. Усиление изгибаемых железобетонных конструкций углепластиковой арматурой // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Прикладные науки*. 2007. № 6. С. 54–59. EDN: XDDHSP.
15. Бадалова Е.Н. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных приклеиванием углепластиковых пластин // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Прикладные науки*. 2009. № 12. С. 45–50. EDN: VNVMP.

REFERENCES

1. Terekhov I.A., Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D. Mechanical Safety of Reinforced Concrete Structures at All Stages of the Life Cycle. *E3S Web of Conferences*. 2023;410:1-9. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341002012>.
2. Smolyago G.A., Demin V.O., Frolov N.V., Drokin S.V. Assessment of the Residual Service Life of Reinforced Concrete Slabs with Corrosion Damage. *Construction and Architecture*. 2023;11(3):1-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2023-11-3-17-17>. EDN: FVRYOY.
3. Sbahieh S., McKay G., Al-Ghamdi S.G. A Comparative Life Cycle Assessment of Fiber-Reinforced Polymers as a Sustainable Reinforcement Option in Concrete Beams. *Frontiers in Built Environment*. 2023;9:1-15. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1194121>.
4. Palacios-Muñoz B., Gracia-Villa L., Zabalza-Bribián I., López-Mesa B. Simplified Structural Design and LCA of Reinforced Concrete Beams Strengthening Techniques. *Engineering Structures*. 2018;174:418-432. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.070>.
5. Pedroso P.F., Correia J.R., Silvestre J.D., Firmo J.P., Garrido M. Environmental and Economic LCA Comparison of Flexural Strengthening Solutions for a Reinforced Concrete Beam. *Materials*. 2024;17(23):1-19. <https://doi.org/10.3390/ma17235879>.
6. Maxineasa S.G., Taranu N. Life Cycle Analysis of Strengthening Concrete Beams with FRP // *Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures*. 2018:673-721. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102181-1.00024-1>.
7. Jahami A., Issa C.A. An Updated Review on the Effect of CFRP on Flexural Performance of Reinforced Concrete Beams. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2024;18:1-24. <https://doi.org/10.1186/s40069-023-00651-y>.
8. Teng J.G., Chen J.F., Smith S.T., Lam L., Chen J.-F. *FRP-Strengthened RC Structures*. Chichester: John Wiley & Sons, 2002. 266 p.
9. Triantafillou T.C., Antonopoulos C.P. Design of Concrete Flexural Members Strengthened in Shear with FRP. *Journal of Composites for Construction*. 2000;4(4):198-205. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2000\)4:4\(198\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2000)4:4(198)).

10. De Lorenzis L., Teng J.G. Near-Surface Mounted FRP Reinforcement: an Emerging Technique for Strengthening Structures. *Composites Part B: Engineering*. 2007;38(2):119-143. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.08.003>.
11. Issa C.A., AbouJouadeh A. Carbon Fiber Reinforced Polymer Strengthening of Reinforced Concrete Beams: Experimental Study. *Journal of Architectural Engineering*. 2004;10(4):121-125. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0431\(2004\)10:4\(121\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0431(2004)10:4(121)).
12. Toutanji H., Zhao L., Zhang Y. Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Externally Strengthened with CFRP Sheets Bonded with an Inorganic Matrix. *Engineering Structures*. 2006;28(4):557-566. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.09.011>.
13. Paranicheva N.V., Nazmeeva T.V. Strengthening of Structural Elements Using Carbon Composite Materials. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2010;2:19-22. (In Russ.). EDN: MZJCWT.
14. Badalova E.N. Strengthening of Reinforced Concrete Flexural Members with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B: Prikladnye nauki*. 2007;6:54-59. (In Russ.). EDN: XDDHSP.
15. Badalova E.N. Experimental Studies of Reinforced Concrete Flexural Members Strengthened by Bonded Carbon Fiber-Reinforced Polymer Plates. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B: Prikladnye nauki*. 2009;12:45-50. (In Russ.). EDN: VNVMP.

Информация об авторах**Пинус Борис Израилевич,**

д.т.н., профессор, профессор кафедры
строительного производства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: pinus@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-3067-9478>
Author ID: 52413

Тоцкий Никита Андреевич,

старший преподаватель кафедры
строительного производства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: markopolo2496@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0008-6167-8305>

Дилбарян Арутюн Мнацаканович,

старший преподаватель кафедры
строительного производства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉e-mail: arutyun_dilbaryan@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-4793-3644>

Слободчикова Надежда Анатольевна,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры автомобильных дорог,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: NSlobodchikova@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7845-2969>
Author ID: 518380

Information about the authors**Boris I. Pinus,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor
of the Department of Building Production,
Irkutsk National Research Technical University, 83
Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russia,
e-mail: pinus@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-3067-9478>
Author ID: 52413

Nikita A. Totskiy,

Senior Lecturer of the Department
of Construction Technology,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russia,
e-mail: markopolo2496@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0008-6167-8305>

Arutyun M. Dilbaryan,

Senior Lecturer,
Department of Construction Technology,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russia,
✉e-mail: arutyun_dilbaryan@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-4793-3644>

Nadezhda A. Slobodchikova,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Automobile Roads,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: NSlobodchikova@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7845-2969>
Author ID: 518380

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 26.11.2025.
Одобрена после рецензирования 29.12.2025.
Принята к публикации 12.01.2026.

Information about the article

The article was submitted 26.11.2025.
Approved after reviewing 29.12.2025.
Accepted for publication 12.01.2026.