



Предпосылки композитного усиления железобетонных элементов и его эффективность на этапах жизненного цикла объектов строительства

А.М. Дилбарян^{1✉}, Б.И. Пинус²

^{1,2}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. В данной статье рассмотрены предпосылки для усиления железобетонных элементов, а также эффективность применения композитных материалов в условиях сурового климата и сейсмической активности. Проведенный анализ охватывает ключевые аспекты деградации строительных конструкций в экстремальных эксплуатационных условиях, включая комплексное воздействие низкотемпературных циклов, динамических нагрузок и коррозионных процессов. Исследованы механизмы ускоренного старения бетонных структур при комбинированном влиянии климатических и эксплуатационных факторов, характерных для регионов Сибири и Дальнего Востока. Особое внимание уделяется вопросам совместной работы бетона, стальной арматуры и внешнего композитного армирования на основе углепластиков с позиций механики деформирования и долговременной адгезионной устойчивости композитно-бетонных систем. Приведены результаты отечественных и зарубежных исследований, указывающие на существенные преимущества данного способа усиления, такие как минимальное увеличение массы конструкций, технологичность монтажа в стесненных условиях и устойчивость к агрессивным средам, а также определенные ограничения и особенности монтажа. Проанализированы современные методики обеспечения качества адгезионных соединений, включая подготовку поверхностей, температурные режимы полимеризации и методы неразрушающего контроля. Систематизированы критерии выбора технологических решений в зависимости от типа повреждений, эксплуатационных нагрузок и климатических факторов. Согласно исследованию, использование углепластика в качестве внешнего армирования демонстрирует высокую эффективность и экономическую целесообразность. Данная технология отвечает современным запросам по восстановлению инфраструктуры, позволяя проводить работы с минимальными помехами для эксплуатации и гарантируя прогнозируемый срок службы усиленных конструкций.

Ключевые слова: жизненный цикл объекта строительства, эксплуатационная надежность, техническое состояние, продление срока службы, капитальный ремонт

Для цитирования: Дилбарян А.М., Пинус Б.И. Предпосылки композитного усиления железобетонных элементов и его эффективность на этапах жизненного цикла объектов строительства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2026. Т. 16. № 1. С. 110–115. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2026-1-110-115>. EDN: EYRYGG.

Original article

Prerequisites for composite reinforcement of reinforced concrete elements and its effectiveness at the stages of the life cycle of construction facilities

Arutyun M. Dilbaryan^{1✉}, Boris I. Pinus²

^{1,2}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. This article discusses the prerequisites for strengthening reinforced concrete elements, as well as the effectiveness of using composite materials in harsh climates and seismic activity. The analysis covers key aspects of the degradation of building structures under extreme operating conditions, including the complex effects of low-temperature cycles, dynamic loads, and corrosion processes. The mech-

anisms of accelerated aging of concrete structures under the combined influence of climatic and operational factors characteristic of the regions of Siberia and the Far East are investigated. Special attention is paid to the issues of joint work of concrete, steel reinforcement and external composite reinforcement based on carbon plastics from the standpoint of deformation mechanics and long-term adhesive stability of composite concrete systems. The results of domestic and foreign studies are presented, indicating the significant advantages of this reinforcement method, such as a minimal increase in the mass of structures, technological installation in cramped conditions and resistance to aggressive environments, as well as certain limitations and installation features. Modern methods for ensuring the quality of adhesive joints, including surface preparation, temperature polymerization solutions, and non-destructive testing methods, are analyzed. The criteria for the selection of technological solutions are systematized depending on the type of damage, operational loads and climatic factors. According to the study, the use of carbon fiber as an external reinforcement demonstrates high efficiency and economic feasibility. This technology meets modern demands for infrastructure rehabilitation, allowing work to be carried out with minimal interference to operation and guaranteeing a predictable service life of reinforced structures.

Keywords: life cycle of the construction site, operational reliability, technical condition, prolongation of service life, major repairs

For citation: Dilbaryan A.M., Pinus B.I. Prerequisites for composite reinforcement of reinforced concrete elements and its effectiveness at the stages of the life cycle of construction facilities. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2026;16(1):110-115. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2026-1-110-115>. EDN: EYRYGG.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях эксплуатации объектов строительства, особенно в регионах с суровым континентальным климатом и высокой сейсмичностью, особое значение приобретают задачи управления жизненным циклом, связанные с обеспечением эксплуатационной надежности, сохранением несущей способности и продлением срока службы железобетонных конструкций.

В этой связи вопросы своевременной диагностики технического состояния, выбора рациональной стратегии восстановления и обоснования решений по усилению рассматриваются не только как конструктивная задача, но и как элемент системы управления жизненным циклом объекта. Преждевременное снижение прочностных и деформационных характеристик конструкций приводит к росту затрат на содержание, ремонт и реконструкцию, а потому требует применения технологий, обеспечивающих восстановление эксплуатационных параметров при минимальном вмешательстве в функционирование объекта.

МЕТОДЫ

Традиционные методы усиления железобетонных конструкций, включая наращивание сечений, устройство металлических обоев и торкретирование, сохраняют практическую значимость, однако в контексте управления жизненным циклом объекта их применение не всегда является оптимальным. Это обусловлено увеличением собственной массы конструкций, ростом трудоемкости работ, необходимостью

технологических остановок, а также дополнительными затратами на последующее содержание и контроль состояния усиленных зон. Вследствие этого возрастает актуальность решений, позволяющих обеспечить восстановление или повышение несущей способности при меньших ресурсных и эксплуатационных издержках [1–3].

В этой связи в современной строительной практике получает развитие альтернативное направление, связанное с применением полимерных композиционных материалов. Наиболее перспективными из них представляются углепластики (CFRP), использование которых позволяет добиться существенного прироста несущей способности, жесткости и сопротивления образованию трещин в железобетонных элементах [5, 6].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Предпосылки усиления железобетонных элементов композитными материалами

Проблемы преждевременного износа

Одной из ключевых предпосылок применения композитного усиления является необходимость продления срока службы железобетонных конструкций, утративших часть эксплуатационной надежности под воздействием природно-климатических и техногенных факторов. В рамках управления жизненным циклом объектов строительства подобные решения рассматриваются как средство перехода от аварийно-восстановительного подхода к планируемому восстановлению технического состояния с учетом остаточного ресурса, условий

эксплуатации и требуемого уровня надежности [6, 7]. При этом усиление выступает не как локальная операция, а как часть комплекса мероприятий по капитальному ремонту, реконструкции и поддержанию работоспособности объекта на последующих стадиях жизненного цикла.

Расширяющийся объем капитального ремонта

Рост объемов капитального ремонта и реконструкции объектов различного назначения свидетельствует о переходе строительной отрасли к модели, в которой приоритет получает не только новое строительство, но и эффективное управление существующим фондом зданий и сооружений.

В этих условиях технологии усиления должны оцениваться с позиции их вклада в продление межремонтного периода, снижение продолжительности вывода объекта из эксплуатации и обеспечение требуемых эксплуатационных характеристик на последующих стадиях жизненного цикла [8]. Применение композитных систем в данном случае представляет интерес как технологическое решение, позволяющее совместить восстановление несущей способности с минимизацией сопутствующих эксплуатационных потерь.

Ограничения традиционных методов

Хотя традиционные технологии усиления, такие как наращивание сечения и установка металлических обойм, получили широкое распространение, их применение оказывается технически ограниченным в ситуациях, характеризующихся стесненными пространственными условиями или необходимостью непрерывного функционирования объекта в процессе производства работ. Экологический аспект применения традиционных методов также заслуживает внимания.

Производство цемента для торкретирования и стали для обойм сопровождается значительными выбросами CO_2 , что противоречит современным тенденциям «зеленого» строительства. Кроме того, увеличение массы конструкции при наращивании сечений приводит к росту нагрузок на фундаменты, что часто требует их дополнительного усиления.

В исторической застройке применение массивных методов усиления может нарушать архитектурный облик объектов культурного наследия, создавая дополнительные ограничения. Классический метод устройства железобетонной рубашки усиления хотя и обеспечивает высокую плотность материала, но также отличается высокой стоимостью и сложностью контроля качества, особенно при значительном объеме работ.

Эксплуатационная и технико-экономическая эффективность композитного усиления на этапах жизненного цикла

Высокая прочность и малый вес

С позиции управления жизненным циклом объектов строительства эффективность композитного усиления определяется не только приростом несущей способности, но и способностью данного решения обеспечивать требуемый уровень эксплуатационной надежности при ограниченных сроках выполнения работ, минимальном увеличении нагрузок на существующие конструкции и сокращении совокупных затрат на ремонтно-восстановительные мероприятия [10, 11]. Использование углепластиковых систем внешнего армирования позволяет рассматривать усиление как инструмент адресного восстановления технического состояния конструктивных элементов без существенного изменения их массогабаритных параметров и функциональной схемы эксплуатации объекта.

Морозостойкость и адгезия при низких температурах

Значительный научный интерес представляют работы по исследованию поведения композитной арматуры в условиях криогенных температур, опускающихся ниже -50°C [11]. Исследования адгезионной прочности при экстремально низких температурах подтверждают стабильность полимерных матриц современных клеевых составов. Критическим фактором является сохранение пластичности клеевого слоя, предотвращающее хрупкое разрушение при температурных деформациях.

Последние разработки в области модификации эпоксидных смол позволяют сохранять адгезионные характеристики при температурах до -60°C , что открывает перспективы для применения композитов в арктических регионах. При этом важное значение имеет предварительная подготовка поверхности бетона, включая обеспыливание и грунтование. Это обстоятельство делает использование композитов в условиях сурового климата более оправданным, чем традиционные методы, требующие больших затрат на поддержание необходимых температурно-влажностных режимов при монтаже.

Экономическая и практическая целесообразность

С экономической позиции применение углепластиковых композитов характеризуется значительными первоначальными затратами на материалы, что компенсируется существенным сокращением трудоемкости работ и уменьшением времени остановки технологического оборудования. Анализ жизненного цикла

композитного усиления показывает его преимущества в долгосрочной перспективе. Хотя первоначальные затраты на материалы могут превышать стоимость традиционных решений на 30–50 %, сокращение трудозатрат на монтаж (до 60 %) и отсутствие необходимости в усилении фундаментов обеспечивают общую экономию средств в течение срока эксплуатации. Особенно значим этот эффект для стратегических объектов, где сокращение времени ремонта на 70–80 % дает мультипликативный экономический эффект за счет минимизации простоев. Применение тонкослойных композитных систем карбонизированной арматуры обеспечивает существенное упрощение монтажных операций в условиях ограниченного пространства благодаря минимальной толщине усиливающих элементов. Одновременно наблюдается снижение потребности в применении вспомогательных металлоконструкций [4, 5]. Следует отметить, что высокая удельная стоимость композитных материалов компенсируется совокупной экономической эффективностью, складывающейся из сокращения эксплуатационных издержек и увеличения нормативного срока службы усиленных конструкций, что в конечном итоге определяет целесообразность их применения.

Примеры и опыт применения композитного усиления

В рамках экспериментальной программы, изложенной в исследовании, проведены испытания серии железобетонных балок, усиленных карбоновыми холстами. Полученные данные демонстрируют увеличение несущей способности элементов на 62–122 % при одновременном существенном ограничении развития упругих деформаций. Мировой опыт применения композитных технологий охватывает широкий спектр объектов – от промышленных цехов до исторических зданий. В скандинавских странах накоплен положительный опыт усиления портовых сооружений, подверженных воздействию морской воды и низких температур. В сейсмоопасных регионах Тихоокеанского пояса композиты применяются для повышения сейсмостойкости каркасов многоэтажных зданий. Во всех случаях критическим фактором успеха является строгое соблюдение технологических регламентов на всех стадиях работ –

от проектирования до контроля качества монтажа. Проведенные испытания в низкотемпературном диапазоне (до -50 °С) не обнаружили критического снижения адгезионных характеристик на границе контакта «бетон-углепластик», что подтверждает перспективность технологии композитного усиления для регионов с экстремальными климатическими условиями.

Мировой опыт [9–11] демонстрирует сопоставимые результаты по долговечности и надежности данных решений.

В строительной практике Канады, Японии и США композитное внешнее армирование успешно применяется при реконструкции мостовых сооружений и эстакад, подвергающихся циклическому замораживанию-оттаиванию.

Ключевым условием эффективности технологии выступает строгое соблюдение регламента подготовки поверхностей и оптимизация состава полимерной матрицы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применение композитных материалов для усиления железобетонных конструкций следует рассматривать в контексте управления жизненным циклом объектов строительства, где приоритетное значение имеют эксплуатационная надежность, продление срока службы, восстановление технического состояния и снижение совокупных затрат на ремонтно-восстановительные мероприятия. Использование систем внешнего армирования на основе углепластика позволяет реализовать рациональную стратегию поддержания и восстановления работоспособности конструкций на стадиях эксплуатации, капитального ремонта и реконструкции. Проведенные исследования доказывают, что конструктивное усиление композитными материалами представляет собой технически и экономически обоснованную альтернативу традиционным методам, особенно в случаях, требующих оперативного восстановления несущей способности конструкций. Полученные результаты определяют перспективные направления для дальнейших изысканий, включая моделирование циклических нагрузок и разработку нормативных положений, учитывающих специфику эксплуатации в условиях пониженных температур и сейсмических воздействий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Онуфриев Н.М. Простые способы усиления железобетонных конструкций промышленных зданий. Л., М.: Госстройиздат, 1958. 176 с.
2. Naser M.Z., Hawileh R.A., Abdalla J.A. Fiber-Reinforced Polymer Composites in Strengthening Reinforced Concrete Structures: A Critical Review // Engineering Structures. 2019. Vol. 198. P. 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109542>.

3. Oehlers D.J. FRP Plates Adhesively Bonded to Reinforced Concrete Beams: Generic Debonding Mechanisms // *Advances in Structural Engineering*. 2006. Vol. 9. Iss. 6. P. 737–750. <https://doi.org/10.1260/136943306779369482>.
4. Rusnak C.R. Sustainable Strategies for Concrete Infrastructure Preservation: A Comprehensive Review and Perspective // *Infrastructures*. 2025. Vol. 10. Iss. 4. P. 1–22. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10040099>.
5. Tatar J., Milev S. Durability of Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Composites in Concrete Structures: A Critical Review // *Polymers*. 2021. Vol. 13. Iss. 5. P. 1–24. <https://doi.org/10.3390/polym13050765>.
6. Green M.F., Dent A.J.S., Bisby L.A. Effect of Freeze-Thaw Cycling on the Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened in Flexure with FRP Sheets // *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2003. Vol. 30. Iss. 6. P. 1081–1088. <https://doi.org/10.1139/I03-059>.
7. Green M.F., Bisby L.A., Beaudoin Y., Labossière P. Effect of Freeze-Thaw Cycles on the Bond Durability between Fibre Reinforced Polymer Plate Reinforcement and Concrete // *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2000. Vol. 27. Iss. 5. P. 949–959. <https://doi.org/10.1139/I00-031>.
8. Del Vecchio C., Di Ludovico M., Prota A. Cost and Effectiveness of Fiber-Reinforced Polymer Solutions for the Large-Scale Mitigation of Seismic Risk in Reinforced Concrete Buildings // *Polymers*. 2021. Vol. 13. Iss. 17. P. 1–15. <https://doi.org/10.3390/polym13172962>.
9. Al Nuaimi N.A., Sohail M.G., Hawileh R.A., Abdalla J.A., Douier K. Durability of Reinforced Concrete Beams Externally Strengthened with CFRP Laminates under Harsh Climatic Conditions // *Journal of Composites for Construction*. 2021. Vol. 25. Iss. 2. P. 1–17. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001113](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001113).
10. Siddika A., Al Mamun M.A., Alyousef R., Amran Y.H.M. Strengthening of Reinforced Concrete Beams by Using Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review // *Journal of Building Engineering*. 2019. Vol. 25. P. 1–37. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100798>.
11. Harajli M.H., Dagher F. Seismic Strengthening of Bond-Critical Regions in Rectangular Reinforced Concrete Columns Using Fiber-Reinforced Polymer Wraps // *ACI Structural Journal*. 2008. Vol. 105. Iss. 1. P. 68–77. <https://doi.org/10.14359/19070>.

REFERENCES

1. Onufriev N.M. *Simple Methods for Strengthening Reinforced Concrete Structures of Industrial Buildings*. Leningrad, Moscow: Gosstroyizdat, 1958. 176 p. (In Russ.).
2. Naser M.Z., Hawileh R.A., Abdalla J.A. Fiber-Reinforced Polymer Composites in Strengthening Reinforced Concrete Structures: A Critical Review. *Engineering Structures*. 2019;198:1-20. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109542>.
3. Oehlers D.J. FRP Plates Adhesively Bonded to Reinforced Concrete Beams: Generic Debonding Mechanisms. *Advances in Structural Engineering*. 2006;9(6):737-750. <https://doi.org/10.1260/136943306779369482>.
4. Rusnak C.R. Sustainable Strategies for Concrete Infrastructure Preservation: A Comprehensive Review and Perspective. *Infrastructures*. 2025;10(4):1-22. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10040099>.
5. Tatar J., Milev S. Durability of Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Composites in Concrete Structures: A Critical Review. *Polymers*. 2021;13(5):1-24. <https://doi.org/10.3390/polym13050765>.
6. Green M.F., Dent A.J.S., Bisby L.A. Effect of Freeze-Thaw Cycling on the Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened in Flexure with FRP Sheets. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2003;30(6):1081-1088. <https://doi.org/10.1139/I03-059>.
7. Green M.F., Bisby L.A., Beaudoin Y., Labossière P. Effect of Freeze-Thaw Cycles on the Bond Durability between Fibre Reinforced Polymer Plate Reinforcement and Concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2000;27(5):949-959. <https://doi.org/10.1139/I00-031>.
8. Del Vecchio C., Di Ludovico M., Prota A. Cost and Effectiveness of Fiber-Reinforced Polymer Solutions for the Large-Scale Mitigation of Seismic Risk in Reinforced Concrete Buildings. *Polymers*. 2021;13(17):1-15. <https://doi.org/10.3390/polym13172962>.
9. Al Nuaimi N.A., Sohail M.G., Hawileh R.A., Abdalla J.A., Douier K. Durability of Reinforced Concrete Beams Externally Strengthened with CFRP Laminates under Harsh Climatic Conditions. *Journal of Composites for Construction*. 2021;25(2):1-17. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001113](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001113).
10. Siddika A., Al Mamun M.A., Alyousef R., Amran Y.H.M. Strengthening of Reinforced Concrete Beams by Using Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review. *Journal of Building Engineering*. 2019;25:1-37. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100798>.
11. Harajli M.H., Dagher F. Seismic Strengthening of Bond-Critical Regions in Rectangular Reinforced Concrete Columns Using Fiber-Reinforced Polymer Wraps. *ACI Structural Journal*. 2008;105(1):68-77. <https://doi.org/10.14359/19070>.

Информация об авторах

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>

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

Information about the authors

Arutyun M. Dilbaryan,
Senior Lecturer of the Department
of the 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>

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

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 24.09.2025.
Одобрена после рецензирования 15.10.2025.
Принята к публикации 31.10.2025.

Information about the article

The article was submitted 24.09.2025.
Approved after reviewing 15.10.2025.
Accepted for publication 31.10.2025.