

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2026, Том 18, № 3 / 2026, Vol. 18, Iss. 3 <https://esj.today/issue-3-2026.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/55SAVN326.pdf>

DOI: 10.15862/55SAVN326 (<https://doi.org/10.15862/55SAVN326>)

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Дулесов, А. Н. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами на основе углеродных волокон / А. Н. Дулесов, Д. П. Малыхин // Вестник евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 3. — URL: <https://esj.today/PDF/55SAVN326.pdf>. DOI: 10.15862/55SAVN326.

For citation:

Dulesov A.N., Malykhin D.P. Reinforcement of reinforced concrete structures with carbon fiber-based composite materials. *The Eurasian Scientific Journal*. 2026;18(3): 55SAVN326. Available at: <https://esj.today/PDF/55SAVN326.pdf>. DOI: 10.15862/55SAVN326. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 69.07.691

Дулесов Александр Николаевич

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Абакан, Россия

Хакасский технический институт

Доцент кафедры «Строительство и экономика»

Кандидат экономических наук, доцент

E-mail: babyshkag@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6371-0171>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=527646

Малыхин Данил Петрович

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Абакан, Россия

Хакасский технический институт

E-mail: danila2012@list.ru

Усиление железобетонных конструкций композитными материалами на основе углеродных волокон

Аннотация. Статья посвящена вопросам усиления железобетонных изгибаемых конструкций с использованием композитных материалов на основе углеродных волокон. В работе рассматриваются физико-механические свойства углепластика, технология усиления конструкций и расчетные методы по нормативной документации.

Во-первых, определены проблемы, решаемые с помощью углеродистого волокна при усилении железобетонных конструкций, которые описываются с позиции устранения дефектов и обеспечения увеличения полезной нагрузки.

Во-вторых, выполнен обзор научной литературы, посвящённый данной теме исследования и проведён анализ традиционных способов усиления железобетонных конструкций с помощью углеродных композитов. Сравнительная характеристика методов усиления из разных материалов в виде сводной таблицы даёт полное представление о физико-механических и технологических свойствах композитных материалов на основе углеродных волокон.

В экспериментальной части представлен расчёт прогибов и раскрытия трещин до и после усиления элементов. Несмотря на достаточность исследований по данной теме, многие вопросы остаются ещё не полностью исследованы: вопросы закономерностей совместной

работы и характера разрушения изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными углеводородными материалами; особенности расчёта контактной зоны «бетон-клеевой» смеси углепластика и другие. В статье приводятся данные об экспериментальном исследовании железобетонных балок. В ходе исследования подтверждена эффективность усиления железобетонных изделий композитными углеродными материалами по сравнению с традиционными способами усиления. Проведенные расчеты подтвердили общее увеличение жесткости конструкции железобетонных балок при усилении углеволокном.

Ключевые слова: железобетонные конструкции; усиление; композитные материалы; углеродное волокно; углепластик; прогибы; трещины; расчетные методики

Введение

Проблемы восстановления и усиления железобетонных конструкций в современных условиях становятся особенно актуальными ввиду возрастающих нагрузок и износа строительных сооружений (рис. 1).



Рисунок 1. Проблемы, решаемые для усиления строительных конструкций углеродным волокном (составлено авторами по источникам информации [1–3])

Весь ряд проблем, при которых требуется усиление железобетонных конструкций, можно разделить на две большие группы: устранение дефектов и поиск вариантов увеличения полезной нагрузки. При этом два этих направления взаимно дополняют друг друга.

Традиционные методы усиления, связанные с изменением и без изменения расчетной схемы напряженного состояния (обоймы железобетонные и металлические, одностороннее наращивание конструкций) характеризуются высокой трудоемкостью, стоимостью, а также невозможностью их проведения без выведения сооружений из эксплуатации [4]. Поэтому актуальным направлением является внедрение композитных материалов, которые обеспечивают значительное повышение эксплуатационных характеристик при относительно низких затратах [5]. Так, композит на основе углеродного волокна имеет значительные преимущества по сравнению с традиционными материалами (сталь, бетон): низкий вес, не утяжеляющий конструкции; абсолютная коррозионная стойкость; долгий срок службы, составляющий более 75 лет; высокая прочность на растяжение; очень высокая усталостная прочность; технологичность монтажа [6; 7].

Необходимо отметить и имеющиеся недостатки, такие как ограничение по температуре при монтаже, чувствительность к ультрафиолету, низкая огнестойкость клеящего состава, высокая стоимость материала. Несмотря на это, явные преимущества в технических характеристиках углеродистого волокна для усиления железобетонных конструкций делают его наиболее эффективным при ремонтных работах.

Целью исследования является оценка характеристик напряженно-деформированного состояния железобетонных изгибаемых элементов, усиленных углепластиком при действии возрастающего кратковременного нагружения.

Обзор литературы

Композиционные материалы на основе углеродных волокон начали широко применяться в строительстве с конца XX века. В России их внедрение ускорилось с появлением нормативного документа СП 164.1325800.2014, описывающего расчет и усиление конструкций композитами.¹

Начиная с 1950-го года, активно изучались свойства углеродистых волокон для внедрения их в промышленность, но масштабные внедрения в строительную сферу деятельности углеродных композитов произошли в конце 80-х годов прошлого столетия, когда данный материал проходит тестовую апробацию для ремонта железобетонных конструкций.

Таблица 1

Сравнительные характеристики усиления железобетонных конструкций углеродным волокном

Показатели	Углеродные волокна	Стальная обойма	Железобетонная обойма
Трудоёмкость работ	Минимальная	Очень высокая, требуется сварка, анкера	Высокая из-за опалубочных, арматурных и бетонных работ
Остановка функционирования объекта (здания, сооружения)	— Не требуется — При больших объёмах работ — Минимальная	Полная или частичная	Полная остановка
Потеря полезной площади	Отсутствует	Минимальная (не более 5 см)	Весьма высокая из-за дополнительного слоя бетона
Изменение массы изолируемых конструкций	Отсутствует	Увеличение нагрузки имеется	Значительное увеличение, что требует дополнительных мероприятий по усилению нижележащих конструкций
Коррозионная стойкость	Абсолютная	Требуется защита	Защитный слой бетона
Огнестойкость	Низкая, необходима огнезащита	Средняя	Низкая
Прочность:			
– на растяжение (изгиб)	Очень высокая	Высокая	Высокая, но зависит от количества армирования
– на срез (сдвиг)	Очень высокая	Высокая	Средняя
Влияние на жёсткость элементов	Не меняется	Умеренно возрастает за счёт стали	Критически возрастает
Пластичность (деформируемость)	Максимальная Деформируется бетон без разрушения	Высокая	Низкая
Адгезия (совместная работа материалов)	Очень высокая (монолитная связь)	Средняя. Материалы работают за счёт трения и обжатия	Плохая. Для обеспечения лучшего сцепления необходимы дополнительные мероприятия
Стоимость	Экономия за счёт сроков	Средняя	Высокая (сварные процессы и сроки)

Составлено авторами по источникам информации [8–11]

Многочисленные испытания усиленных углеродными композитами конструкций привели к формированию нормативной базы, начиная с европейской школы (1990–2000 гг.) в России также проходили испытания нового композитного материала для усиления железобетонных

¹ СП 164.1325800.2014 Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования. — М.: Минстрой России, 2015.— 67с.

СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 — М.: Минрегион России, 2012. — 168с.

конструкций, что в дальнейшем было стандартизировано в нормативных документах. Таким образом, сформировалось направление по исследованию и внедрению новых композитов из углеродистого волокна для усиления и ремонта строительных конструкций.

Ещё одним направлением в применении углепластиков является сейсмостойкое строительство, как отмечено в трудах А. Н. Давидюка, В. И. Римшина [8]. Защита зданий в сейсмически опасных районах применяется по технологии «тейпирования» ограждающих конструкций, в том числе такая защита эффективна и для большепролётных зданий.

Итогом обзора литературы стала общее заключение об основных характеристиках углеродных композитных материалов в качестве усиления железобетонных конструкций (табл. 1).

Анализ характеристик усиления железобетонных конструкций материалами на основе углеродных волокон свидетельствует о явных его преимуществах. Композитные материалы обеспечивают не только высокие физико-технические свойства усиленным конструкциям, но и они более технологичные и перспективные в отношении сейсмоусиления, так как способствует созданию эффекта объёмного сжатия. Ещё одним преимуществом сейсмостойкости углеволокна является неизменная жёсткость конструкции, в отличие, например, от железобетонной обоймы, которая резко увеличивает поперечные сечения и жёсткость элемента.

Методика исследования

Исследования проводились на железобетонных балочных конструкциях, усиленных композитной лентой системы «Sika CarboDur S512». Использовался инженерный метод расчета по нормативной документации СП 164.1325800.2014 и СП 63.13330.2012. Экспериментальные данные были получены из ранее проведенных испытаний.

Для уточнения основных формул и допущений нормативной документации, а также обоснования её методик были сформулированы следующие задачи исследования:

- на основании экспериментальных данных произвести оценку деформаций и несущей способности железобетонных изгибаемых элементов до и после усиления, используя методику расчета нормативной документации;
- выполнить анализ влияния способов учёта жёсткости железобетонных балочных элементов на прогибы конструкций;
- исследовать влияния формы эпюры напряжений сжатой зоны бетона на величины прогибов конструкций;
- получить дополнительную информацию к методике расчета железобетонных элементов конструкций, усиленных углепластиком.

Согласно рекомендациям при исследовании усиленных конструкций углеродистыми композитами были приняты общие положения расчёта железобетонных конструкций по прочности нормальных сечений на основе предельных усилий на действие фактической нагрузки.

Расчеты проводились по двум группам предельных состояний: по несущей способности (первой группы) и по эксплуатационным характеристикам — раскрытию трещин и прогибам (второй группы).

Исследование проводилось на изготовленных образцах балок в виде бетонных призм из бетона класса В20, армированных таким образом, чтобы предотвратить возникновению наклонных трещин.

Результаты исследования

В ходе расчетов определены расчетные предельные моменты балок до и после усиления, которые показали увеличение несущей способности на 47,8–53,8 %. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных подтвердило надежность предложенных нормативных методик, несмотря на то, что расчетные значения несущей способности на 30–34 % превышают экспериментальные данные из-за нормативного запаса прочности.

Расчеты по второй группе предельных состояний продемонстрировали, что усиление углепластиком значительно снижает прогибы конструкций (на 18,35–30,99 %) и уменьшает ширину раскрытия трещин (на 0–26,68 %), подтверждая эффективность метода усиления углеродными композитами.

Обсуждение результатов

Анализ полученных результатов показал, что для определения жесткости железобетонных элементов целесообразнее использовать модифицированную формулу с учетом растянутой зоны бетона и композитного материала. Это позволило получить значения прогибов, близкие к экспериментальным. При уровнях нагрузки выше эксплуатационных рекомендуется учитывать прямоугольную эпюру напряжений, что дает наиболее точные результаты при расчете конструкций.

В ходе проведенного исследования были получены данные, подтверждающие эффективность использования композитных материалов на основе углеродных волокон для усиления железобетонных конструкций. Расчетные исследования проводились по двум группам предельных состояний: первая — по несущей способности, и вторая — по эксплуатационным показателям, включающим оценку прогибов и ширины раскрытия трещин.

Анализ расчетов по несущей способности показал значительное увеличение прочности балочных конструкций после усиления углеродными композитами. В частности, балка «П1», усиленная без предварительного испытания, продемонстрировала рост расчетного значения предельного изгибающего момента до 14,81 кН·м, что на 53,8 % превышает показатель аналогичной балки без усиления (9,63 кН·м). Сравнение с экспериментальными данными показало, что расчетные значения несколько превышают опытные (примерно на 30–34 %), что объясняется нормативным запасом прочности, заложенным в используемых методиках.

При этом для предварительно испытанной и затем усиленной балки «БО-2(П1)» расчетное увеличение несущей способности составило 47,8 %, тогда как в экспериментальных испытаниях эта величина оказалась существенно ниже — всего 18,1 %. Данное расхождение обусловлено сложностью точного учёта исходных повреждений и напряженно-деформированного состояния элементов после предварительного нагружения, что требует дальнейших исследований для уточнения расчетных моделей.

Во второй части исследования проводилась оценка эксплуатационных характеристик, включающая расчет прогибов и раскрытия трещин до и после усиления конструкций. Использование предложенных расчетных методик позволило выявить четкие тенденции в изменении деформативных характеристик железобетонных элементов. Усиление углеродными композитами обеспечило заметное уменьшение прогибов конструкции при всех уровнях нагружения. Так, расчетные прогибы балки «П1» после усиления были ниже, чем прогибы аналогичной неусиленной балки «БО-2», в среднем на 18,35–26,68 %, в зависимости от степени нагружения конструкции. Экспериментальные данные также подтвердили эту тенденцию, показав близкое соответствие расчетных и реальных значений, особенно после внесения в расчет модифицированной формулы жесткости с учётом работы растянутой зоны и углеродного материала.

Оценка трещиностойкости подтвердила, что применение композитных материалов существенно улучшает эксплуатационные характеристики железобетонных конструкций. Расчётная ширина раскрытия нормальных трещин после усиления конструкции была снижена на 18,35–30,99 % по сравнению с аналогичными показателями для неусиленных элементов. Это связано с повышением общей жесткости конструкции за счёт эффективного использования высокомодульных углеродных волокон.

Дополнительно в ходе расчётов было проведено сравнение различных подходов к учёту формы эпюры напряжений в сжатой зоне бетона. Анализ показал, что при начальных этапах нагружения предпочтительно использовать треугольную эпюру напряжений, однако на высоких уровнях нагрузки, приближающихся к предельным, целесообразно переходить на прямоугольную эпюру, что позволяет получить более реалистичное и точное значение прогибов. Внесённые уточнения в расчётные формулы позволили получить удовлетворительное соответствие с экспериментальными значениями прогибов.

Таким образом, полученные результаты подтвердили высокую эффективность усиления железобетонных конструкций композитными материалами на основе углеродных волокон.

Заключение

Проведенные исследования и расчеты подтвердили перспективность применения композитных материалов на основе углеродных волокон для усиления железобетонных конструкций. Применение углепластика позволяет существенно увеличить несущую способность и снизить деформации конструкций, что делает данный метод предпочтительным перед традиционными способами [12–14]. Результаты исследований могут быть использованы проектными организациями при проектировании и реконструкции зданий и сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неволин Д. Г. Усиление железобетонных конструкций зданий и сооружений различного назначения полимерными композиционными материалами / Д. Г. Неволин, Д. Н. Смердов, М. Н. Смердов. — Екатеринбург: УрГУПС, 2017. — 151 с. EDN: YLLBYD.
2. Yungon Kim, Kevin Quinn, Neil Satrom, Jose Garcia, Wei Sun, Wassim M Ghannoum, James O Jirsa Shear strengthening of reinforced and prestressed concrete beams using carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets and anchors / Texas Department of Transportation, 2012. — 301 p. — URL: https://scholar.google.co.in/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=iFd3cIwAAAAJ&citation_for_view=iFd3cIwAAAAJ:YsMSGLbcyi4C.
3. Леонова А. Н. Усиление строительных конструкций с помощью углеродных и композиционных материалов / Черная А. А., Антонов В. В., Леонова А. Н. / — DOI: 10.26297/2312-9409.2026.1.15: Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". 2026. № 1. С. 199–214.
4. Щербенкова, В. В. Применение композитных материалов при восстановлении, реконструкции, реставрации зданий и сооружений. Экономическое сравнение различных вариантов усиления / В. В. Щербенкова // Перспективы развития фундаментальных наук: Сборник научных трудов XII Международной конференция студентов и молодых ученых, Томск, 21–24 апреля 2015 года / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. — Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2015. — С. 1311–1313. — EDN UHZLDN.

5. Никитин, С. И. Применение композитных материалов при ремонте и восстановлении железобетонных пролетных строений / С. И. Никитин, Е. Б. Смирнов // Теория и практика восстановления искусственных сооружений на железных дорогах: сборник научных трудов по материалам отраслевой научно-практической конференции, Санкт-Петербург, Петергоф, 19 апреля 2023 года. — Санкт-Петербург: Военный институт (Железнодорожных войск и военных сообщений), 2023. — С. 8–10. — EDN KXZOVN.
6. Есипов, С. М. Методы усиления железобетонных конструкций композитными материалами / С. М. Есипов, С. И. Меркулов // Эффективные строительные конструкции: теория и практика: Сборник статей XV Международной научно-технической конференции, Пенза, 28 мая — 29 2015 года / Под редакцией Н. Н. Ласькова. — Пенза: Автономная некоммерческая научно-образовательная организация «Приволжский Дом знаний», 2015. — С. 26–34. — EDN YOIYSC.
7. Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами / А. А. Шилин, В. А. Пшеничный, Д. В. Картузов, Д. В. Картузов; А. А. Шилин, В. А. Пшеничный, Д. В. Картузов. — Москва: Стройиздат, 2004. — 144 с. — ISBN 5-274-01909-9. — EDN QNKRFХ.
8. Способы получения углекомпозитной арматуры с повышенными физико-механическими характеристиками и возможность ее применения в бетонных конструкциях / А. Н. Давидюк, В. И. Римшин, П. С. Трунтов [и др.] // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. — 2024. — № 6(287). — С. 52–56. — EDN CUTLFV.
9. Параничева, Н. В. Усиление строительных конструкций с помощью углеродных композиционных материалов / Н. В. Параничева, Т. В. Назмеева // Инженерно-строительный журнал. — 2010. — № 2(12). — С. 19–22. — EDN MZJCWT.
10. Систематизация и анализ нормативно технической документации по применению полимерных композиционных материалов в транспортном строительстве. Часть 2 / И. И. Овчинников, И. Г. Овчинников, Е. Д. Ильченко, Е. С. Михалдыкин // Интернет-журнал Науковедение. — 2017. — Т. 9, № 1. — С. 45. — EDN YMXOZV.
11. Шилов, А. В. Опыт усиления железобетонных конструкций композиционными материалами в России и за рубежом / А. В. Шилов, А. И. Кузнецов // Строительство и архитектура — 2015: материалы международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 26–27 ноября 2015 года / ФГБОУ ВПО "Ростовский государственный строительный университет", Союз строителей южного федерального округа, Ассоциация строителей Дона. Том I. — Ростов-на-Дону: Редакционно-издательский центр РГСУ, 2015. — С. 29–31. — EDN UXDRAB.
12. Анализ достоинств и недостатков способа усиления железобетонных конструкций при помощи композитных материалов из углеволокна / Л. В. Косарев, В. И. Вавилов, Н. Ю. Болдырев [и др.] // Инновации и инвестиции. — 2021. — № 11. — С. 155–159. — EDN WPIWZG..
13. Польской, П. П. Особенности работы железобетонных конструкций, усиленных разномодульными композитными материалами / П. П. Польской, А. Г. Умаров // Строительство и архитектура — 2023: материалы международной научно-практической конференции факультета промышленного и гражданского строительства, Ростов-на-Дону, 19–21 апреля 2023 года. — Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2023. — С. 139–140. — EDN ZZFJQK.

14. Zoi Tetta Textile-reinforced mortar (TRM) versus fiber-reinforced polymers (FRP) in shear strengthening of concrete beams / Zoi Tetta, Lampros Koutas, Dionysios A. Bournas // Composites Part B Engineering. — 2015. — № 95(2). — URL: https://www.researchgate.net/publication/274142162_Textile-Reinforced_Mortar_TRM_versus_Fiber-Reinforced_Polymers_FRP_in_Shear_Strengthening_of_Concrete_Beams.

Dulesov Alexander Nikolaevich

Khakass Technical Institute
Siberian Federal University, Abakan, Russia
E-mail: babyshkag@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6371-0171>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=527646

Malykhin Danil Petrovich

Khakass Technical Institute
Siberian Federal University, Abakan, Russia
E-mail: danila2012@list.ru

Reinforcement of reinforced concrete structures with carbon fiber-based composite materials

Abstract. The article is devoted to the issues of reinforcement of reinforced concrete bendable structures using composite materials based on carbon fibers. The paper considers the physico-mechanical properties of carbon fiber, reinforcement technology of structures and calculation methods according to regulatory documentation.

First, the problems solved by carbon fiber in reinforcing reinforced concrete structures have been identified, which are considered from the perspective of eliminating defects and increasing the payload.

Secondly, a review of the scientific literature devoted to this research topic has been carried out and an analysis of traditional methods of reinforcing reinforced concrete structures and using carbon composites has been carried out. A comparative description of reinforcement methods from different materials in the form of a summary table gives a complete picture of the physico-mechanical and technological properties of carbon fiber-based composite materials.

In the experimental part, deflections and crack openings were calculated before and after reinforcement of the elements. Despite the sufficiency of research on this topic, many issues remain to be fully investigated: the issues of patterns of joint work and the nature of destruction of bent reinforced concrete elements reinforced with composite hydrocarbon materials; the specifics of calculating the contact zone of a concrete-adhesive mixture of carbon fiber and others. Therefore, the article provides data on the feasibility of studying reinforced concrete beams. The study confirmed the effectiveness of the proposed techniques in comparison with traditional methods of reinforcement.

Keywords: reinforced concrete structures; reinforcement; composite materials; carbon fiber; carbon fiber composite; deflections; cracks; calculation methods