

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА УСИЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СИСТЕМАМИ ВНЕШНЕГО АРМИРОВАНИЯ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю.А. Морозова¹, juliaandreeva99@mail.ru

Г.Э. Окольников^{1,2}, okolnikova_ge@mail.ru

¹ Российский университет дружбы народов им. П. Лумумбы, Москва, Россия

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

Аннотация. В данной работе рассмотрены методы контроля качества усиления железобетонных конструкций системами внешнего армирования (СВА) из композитных материалов в строительстве мостов и эстакад, проанализированы основные функции их использования. Основная цель данного исследования заключалась в представлении обзора различных методов контроля качества наклейки углеволокна, изучении опыта применения углеродных волокон в строительной отрасли и основных перспективных направлений развития. В статье предлагается рассмотреть четыре неразрушающих метода контроля, которые позволяют оценивать состояние системы внешнего армирования без повреждения конструкций: ультразвуковая дефектоскопия, импульсно-эховый метод, вибродиагностика и акустическая эмиссия. Для достижения этой цели был проведен анализ научных исследований, применялись теоретические методы, основанные на изучении и обобщении ранее опубликованных работ зарубежных и отечественных авторов. В работе рассматривается применимость систем внешнего армирования из полимерных композитных материалов в качестве несущего материала в конструкциях мостов. Исследование успешного опыта применения углеволокнистых материалов основано на анализе существующих научных работ на изучаемую тематику и смежные с ней. Основные методы контроля качества позволяют обнаружить дефекты в композитных материалах, такие как расслоения, пустоты и трещины. В работе была рассмотрена применимость углеродных волокон и композитов на их основе в строительстве, в частности, в качестве альтернативы традиционным конструкционным материалам, таким как сталь. Регулярное использование методов контроля СВА способствует продлению срока службы конструкций и снижению риска возникновения аварийных ситуаций, что является ключевым фактором для устойчивого развития инфраструктуры и обеспечения безопасности общества.

Ключевые слова: внешнее армирование, углеволокно, строительство, мосты, полимерный композитный материал, усиление конструкций

Для цитирования. Морозова Ю.А., Окольников Г.Э. Методы контроля качества усиления железобетонных конструкций системами внешнего армирования из композитных материалов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2024. Т. 24, № 3. С. 15–23. DOI: 10.14529/build240302

Original article
DOI: 10.14529/build240302

THE QUALITY CONTROL OF CONCRETE STRUCTURES REINFORCED WITH EXTERNAL COMPOSITE REINFORCEMENT

J.A. Morozova¹, juliaandreeva99@mail.ru

G.E. Okolnikova^{1,2}, okolnikova_ge@mail.ru

¹ RUDN University, Moscow, Russia

² Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

Abstract. This article reviews the quality control (QC) of concrete structures reinforced with external composite reinforcement in the construction of bridges and overpasses. The study presents an overview of various methods of QC of carbon fiber sticking to study the application of carbon fiber in the construction industry and the main directions of development. The article considers four non-destructive testing methods that can assess the condition of an external reinforcement system without damaging the structure: ultrasonic flaw detection, pulse-echo, vibration diagnostics, and acoustic emission. To achieve this goal, theoretical methods were applied based on previously published works.

The article considers the applicability of external reinforcement systems made of polymer composite as a load-bearing material in bridge structures. The study of the application of carbon fiber materials is based on the analysis of the literature. Basic QC methods can detect defects in composite materials such as delamination, voids, and cracks. The paper considered the applicability of carbon fiber and composites in construction, in particular, as an alternative to traditional structural materials such as steel. Regular use of SVA control methods helps to extend the service life of structures and reduce the risk of emergency situations, which is a key factor for the sustainable development of infrastructure and to ensure public safety.

Keywords: quality control, external reinforcement, carbon fiber, construction, bridges, polymer composite material, reinforcement of structures

For citation. Morozova J.A., Okolnikova G.E. The quality control of concrete structures reinforced with external composite reinforcement. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture.* 2024;24(3):15–23. (in Russ.). DOI: 10.14529/build240302

Введение

Совершенствование науки и развитие техники, строительство новых объектов, рециклинг строительных материалов и автоматизация технологических процессов способствуют развитию и применению инновационной и наукоемкой продукции в строительной области и промышленности [1]. Основными критериями при изготовлении новых конструкций и использовании существующих являются надежность и безопасность.

Сегодня в эксплуатации находится большое количество крупных инженерных сооружений, в том числе мостов, эстакад, которые были спроектированы и возведены в разное время в соответствии с нормативными документами каждого из периодов времени [2]. Продолжительная эксплуатация при продолжительном воздействии нагрузок может привести к снижению несущей способности и грузоподъемности конструкций и, как следствие, повлиять на уровень безопасности при их эксплуатации [3]. Усиление существующих конструкций стало основным видом строительной деятельности в соответствии с модернизированными проектными нормами и требованиями к прочности, а также из-за ухудшения состояния окружающей среды с течением времени [4–7].

Оценка технического состояния мостов и эстакад показывает, что степень износа дорожных сооружений может варьироваться в достаточно широких пределах, обычно от 30 до 70 %.

Конструкции часто подвергаются экстремальным нагрузкам, которые приводят к их преждевременному износу, и замена этих конструкций до истечения расчетного срока службы обходится довольно дорого [8].

Разрушительное воздействие окружающей среды на строительные материалы обусловлено несколькими факторами, включая осадки, меняющуюся влажность, колебания температуры, влажность почвы и наличие агрессивных химических веществ [9–11]. Длительное воздействие этих факторов оказывает негативное влияние на поверхность бетона и арматурные стальные конструкции, делая их уязвимыми для разрушительных дефектов, которые могут иметь необратимые последствия.

Разрушение бетона в местах опирания несущих балок, трещины в металлической арматуре из-за длительного эксплуатационного воздействия, разрушение бетонных элементов из-за мороза и коррозия арматуры, а также ухудшение механических свойств металлических балок из-за усталости материала – все это является основными причинами снижения несущей способности конструкций.

В России уже около 10–20 лет весьма активно применяются системы внешнего армирования (СВА), которые предназначены для укрепления железобетонных и каменных конструкций [12]. При усилении разного типа конструкций используются либо холсты, либо ламели: для ремонта мостов используются ламели, а для усиления элементов со сложной конфигурацией – холсты. Благодаря множеству исследований, проведенных в области поведения таких конструкций, были разработаны стандарты и нормы для проектирования усиления. Зарубежные страны начали использовать СВА уже в 80-х годах, что привело к разработке нормативных документов по усилению конструкций в этих странах немного раньше.

В современной России действует большое количество национальных стандартов в области композитных материалов и конструкций. Тем не менее разработка эффективных методов оценки технического состояния и контроля качества работ в СВА остается актуальной проблемой [13, 14]. В нормативных документах по проектированию усиления конструкций СВА на основе углеродного волокна (углеволокна) предусмотрена процедура контроля качества. В правилах проектирования усиления конструкций СВА из углеволокна обязательно предусмотрена процедура контроля качества. Однако конкретные нормативы и методы, которые должны использоваться, в этих документах не указываются. Аналогичная ситуация наблюдается и в методиках обследования.

Практика показала, что отслоение клеящего материала является распространенным дефектом усиления в процессе применения СВА. Методы усиления конструкций могут включать нанесение внешнего слоя из металлической пластины, листа текстильного волокна, проволочной сетки, использование композитных материалов, бетонную или

стальную оболочку, а также применение эпоксидной смолы.

Материалы и методы

Использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) или армированных листов на основе углеродных армирующих волокон является эффективным методом для усиления инженерных сооружений, например, таких как мосты. Применение данного подхода не только облегчает усиление несущих элементов, но и снижает их вес [15]. Композитные материалы на основе углерода обладают высокой удельной прочностью и могут использоваться в различных климатических условиях. Стекланные или гибридные ПКМ подходят для тех, кто стремится сократить расходы.

Бренды FibArm, S&P, MasterBrace, SikaWrap, Тогауса и др. производят материалы для усиления как в России, так и за рубежом. Внедрение композитных СВА с использованием углеродных армирующих волокон способны повысить экономическую эффективность на 15–65 %.

Проблема отсутствия четких требований к контролю СВА обусловлена следующими факторами:

1) многообразие композитных материалов и методов их применения, что требует разработки специализированных методов контроля для каждого конкретного случая;

2) относительная новизна технологии СВА, из-за чего накопленный объем экспериментальных данных по контролю качества недостаточен;

3) сложность оценки состояния композитных материалов, поскольку их свойства могут существенно изменяться под воздействием различных факторов.

Отсутствие эффективных методов контроля СВА несет в себе серьезные риски для безопасности и долговечности эксплуатируемых сооружений. Например, некачественное армирование может привести к снижению несущей способности конструкций, деформациям и даже обрушению.

Для решения этой проблемы необходимо провести научно-исследовательские работы по разработке и внедрению специализированных методов контроля СВА. Эти методы должны учитывать специфические особенности композитных материалов и обеспечивать достоверную и объективную оценку их технического состояния.

Одним из перспективных направлений является разработка неразрушающих методов контроля, которые позволяют оценивать состояние СВА без повреждения конструкций. К таким методам относятся:

- ультразвуковая дефектоскопия;
- импульсно-эховый метод;
- вибродиагностика;
- акустическая эмиссия.

Эти методы позволяют обнаружить дефекты в композитных материалах, такие как расслоения,

пустоты и трещины. Однако для их эффективного использования необходимо разработать соответствующие методики и нормы. Кроме того, важно повышать квалификацию специалистов, занимающихся контролем СВА [16]. Для этого необходимо разработать учебные программы и организовать курсы повышения квалификации [17]. Решение проблемы контроля СВА позволит повысить надежность эксплуатируемых сооружений, продлить их срок службы и обеспечить безопасность людей.

Использование СВА на основе углеродного волокна на конструкциях мостов и эстакад является эффективным методом повышения их прочности, несущей способности и долговечности. СВА позволяет восстановить эксплуатационные характеристики сооружений, поврежденные в результате механических воздействий, коррозии, низких температур или других факторов.

Ультразвуковая дефектоскопия в строительстве – эффективный метод неразрушающего контроля, который основан на исследовании распространения ультразвуковых колебаний в предметах с использованием специального оборудования – ультразвукового преобразователя и дефектоскопа.

Этот метод основан на использовании ультразвуковых волн высокой частоты, которые распространяются в исследуемом объекте и отражаются от границ раздела сред с различными акустическими свойствами [18]. Дефекты, такие как трещины, пустоты и расслоения, вызывают отклонения в пути распространения волн, что регистрируется специальным оборудованием [19–21]. Ультразвуковой дефектоскоп генерирует короткие импульсы ультразвуковых волн, которые передаются в материал с помощью преобразователя. Отраженные от дефектов волны регистрируются тем же или другим преобразователем. Время распространения волны и ее амплитуда позволяют определить местоположение и размер дефекта.

Основными преимуществами ультразвуковой дефектоскопии являются:

1) неразрушающий характер: метод не повреждает исследуемый объект, что позволяет проводить повторные проверки без ущерба для конструкции;

2) высокая чувствительность: ультразвуковые волны способны обнаруживать небольшие дефекты, которые могут быть незаметны другими методами;

3) точность: метод позволяет определить точное местоположение и размер дефектов;

4) многофункциональность: ультразвуковая дефектоскопия может использоваться для контроля различных материалов, включая бетон, сталь, дерево и композиты.

Ультразвуковой контроль – это быстро развивающаяся практическая технология, которая получила значительное развитие в последние годы. Его

фундаментальный принцип заключается в воздействии на тестируемый объект упругих ультразвуковых волн определенной частоты. Анализируя сигналы с помощью специализированных приборов, этот метод выявляет распределение объектов, а также механические характеристики внутренних дефектов. Ультразвуковой метод основан на различиях в скорости импульса и потерях при передаче в различных средах [22]. Ультразвуковые волны эффективно распространяются в плотных средах, но трещины вызывают дифракцию или преломление света. Следовательно, этот механизм позволяет обнаруживать и оценивать масштаб и направление трещин в материале. Когда плотность среды остается постоянной, ультразвуковые волны могут распространяться по прямой линии вдоль своего направления [23]. Чем короче длина волны, тем лучше способность к прямому излучению.

Ультразвуковой метод использует принцип, согласно которому скорость волны и потери при передаче изменяются, когда ультразвуковые волны распространяются в различных передающих средах. В воздухе скорость распространения составляет 300 м/с, тогда как в воде она составляет примерно 1300–1400 м/с.

При использовании СВА важно обеспечить надлежащую защиту материала от воздействия внешних факторов, таких как резкие колебания температуры, возгорание, ультрафиолетовые лучи и механические повреждения [24]. В местах с легким доступом к конструкции необходимо предусмотреть меры защиты от вандализма.

Для оценки эффективности и долговременной работы усиленной конструкции устанавливается система долгосрочного мониторинга [25]. Она включает в себя периодические проверки состояния СВА, измерения деформаций конструкции и мониторинг ее несущей способности.

Отдельными этапами контрольной проверки являются:

- 1) визуальный осмотр на наличие повреждений, трещин и сколов, коррозионных дефектов и пр.;
- 2) испытания на отрыв для оценки адгезии углеродного волокна к бетону;
- 3) Ультразвуковая и акустическая эмиссионная диагностика для выявления внутренних дефектов и напряжений в материале;
- 4) неразрушающий контроль и оценка прочности клеевого соединения с помощью метода ударно-импульсного возбуждения.

Данный многоэтапный подход к контролю перед использованием СВА позволяет обеспечить высокую надежность и долговечность усиленных конструкций мостов и эстакад.

Импульсно-эховый метод позволяет проводить диагностику без необходимости повреждать или разбирать конструкцию, что снижает риск дополнительных повреждений и уменьшает затраты на ремонт.

Принцип работы импульсно-эхового метода в строительстве основан на использовании звуковых импульсов для оценки состояния системы внешнего армирования конструкций без их повреждения. Основным информационным параметром является интервал времени между моментом инициации акустического импульса и моментом регистрации отраженных акустических сигналов [26]. В соответствии с указанными источниками этот метод включает в себя следующие этапы:

1) генерация импульса: специальное оборудование генерирует звуковые импульсы, которые направляются на поверхность конструкции;

2) отражение сигнала: звуковые волны отражаются от внешнего армирования конструкции и возвращаются к датчикам;

3) регистрация и анализ отраженных сигналов: полученные эхо-сигналы регистрируются и анализируются для определения характеристик состояния армирования, таких как наличие дефектов, коррозии или разрушений.

Этот метод обеспечивает довольно точную оценку состояния армирования и может выявлять даже небольшие дефекты или повреждения.

Поскольку импульсно-эховый метод не требует физического воздействия на конструкцию, он обеспечивает безопасность как для рабочих, так и для окружающей среды.

Однако у данного метода присутствуют некоторые недостатки: в зависимости от типа конструкции и используемого оборудования этот метод может иметь ограничения по глубине проникновения звуковых волн, что может затруднить обнаружение дефектов внутри толстых или плотных структур [27].

Для успешного применения этого метода требуется специальная квалификация и опыт работы с оборудованием, чтобы правильно интерпретировать полученные данные и сделать правильные выводы о состоянии конструкции.

Импульсно-эховый метод является эффективным инструментом для диагностики состояния внешнего армирования в строительстве, однако его применение требует внимательного подхода и экспертизы для достижения точных и надежных результатов.

Вибродиагностика широко применяется в инженерном строительстве для оценки состояния армирования и обнаружения дефектов в конструкциях без необходимости их разрушения.

История возникновения вибродиагностики в строительстве как метода оценки состояния системы внешнего армирования без повреждения конструкций начинается с зарождения принципов неразрушающего контроля.

Идея использования вибрационных волн для диагностики строительных конструкций стала получать популярность в конце XX века. Первоначально этот метод применялся в области инженерных изысканий для оценки грунтовых оснований и свойств

почвы. Однако в дальнейшем его применение расширилось на оценку состояния более сложных строительных конструкций, включая здания, мосты, дамбы и другие инфраструктурные объекты.

Этот метод стал неотъемлемой частью процесса строительства и обслуживания инфраструктурных объектов, обеспечивая безопасность и надежность сооружений. Методы активной вибродиагностики характеризуются искусственным приложением к конструкции сооружения импульсной или гармонической вибрационной нагрузки [28].

Принцип работы вибродиагностики в строительстве заключается в использовании вибрационных волн для оценки состояния системы внешнего армирования конструкций без их повреждения.

Вибродиагностика может обнаруживать даже малейшие изменения в структуре или состоянии армирования, что помогает предотвратить потенциальные проблемы в будущем.

Данный метод обычно быстрый и эффективный, что позволяет проводить диагностику больших областей за короткое время.

Недостатки вибродиагностики включают:

- 1) ограниченную глубину проникновения;
- 2) необходимость квалификации;

3) результаты вибродиагностики могут быть искажены воздействием внешних факторов, таких как шум, вибрация окружающей среды или другие конструкции.

Метод акустической эмиссии в строительстве основан на измерении и анализе звуковых сигналов, которые генерируются внутри материала или конструкции под воздействием внешних нагрузок или процессов деформации [29].

Принцип работы заключается в следующем: при возникновении дефектов или повреждений в конструкции происходит выделение микроскопических сигналов акустической эмиссии. Эти сигналы могут возникать из-за различных процессов, таких как трение, разрушение материала или перемещение дефектов. Датчики или микрофоны устанавливаются на поверхности конструкции для регистрации звуковых сигналов акустической эмиссии. Далее полученные сигналы анализируются с помощью специализированных программ для определения характеристик и местоположения дефектов или повреждений в конструкции.

Для успешного применения метода акустической эмиссии необходимо обладать опытом и квалификацией для правильной интерпретации полученных данных и сделать выводы о состоянии конструкции.

Результаты исследования

Выводы, которые можно сделать на основе вышесказанного, следующие:

1. Главными целями применения систем внешнего армирования из композитных материалов для строительных конструкций являются

обеспечение максимально эффективной защиты функционирования сооружений, усиление несущей способности перекрытий, ригелей, колонн или других частей здания, нуждающихся в дополнительном армировании.

2. Использование современных методов контроля качества зданий и сооружений в различных отраслях, таких как строительство, транспорт, энергетика и др., играет важную роль в оценке текущего состояния технических систем и обеспечении их безопасности. Каждый из перечисленных методов неразрушающего контроля имеет свои особенности и применимость в строительстве, и выбор оптимального метода зависит от конкретной ситуации и требований задачи:

– метод ультразвуковой дефектоскопии обычно применяется для оценки толщины материалов, обнаружения трещин, включений и других дефектов. Ультразвуковая дефектоскопия может быть полезной при оценке состояния бетонных конструкций, поиске внутренних дефектов и измерении толщины арматуры;

– импульсно-эховый метод часто используется для обнаружения дефектов в арматуре бетонных конструкций, в том числе деталей мостов, и оценки их целостности;

– вибродиагностика может быть полезна для оценки состояния армирования, обнаружения дефектов и мониторинга изменений в конструкции;

– акустическая эмиссия позволяет проводить мониторинг состояния конструкции в реальном времени, что обеспечивает возможность оперативного реагирования на любые изменения или повреждения.

Заключение и обсуждение

Использование композитных материалов для армирования и усиления несущих конструкций является одним из наиболее актуальных методов поддержания работоспособности и продления срока службы мостовых сооружений, эксплуатирующихся в тяжелых условиях. В связи с этим методы, такие как ультразвуковая дефектоскопия, импульсно-эховый метод, вибродиагностика и акустическая эмиссия, играют ключевую роль в обеспечении безопасности и надежности строительных объектов.

Первостепенное значение данных методов заключается в их способности предоставить информацию о состоянии конструкций без необходимости их разрушения или демонтажа. Это позволяет инженерам и строителям проводить регулярный мониторинг, обнаруживать дефекты и потенциальные проблемы на ранних стадиях их развития, а также принимать соответствующие меры по их устранению.

Регулярное использование этих методов способствует продлению срока службы конструкций и снижению риска возникновения аварийных ситуаций, что является ключевым фактором для устойчи-

Список литературы

1. Ванус Д.С., Побудилина А.А. Проектирование усиления железобетонных конструкций композитными материалами на основе углеволокна // Перспективы науки. 2021. № 11(146). С. 67–71.
2. Быков А.А. Использование метода инфракрасной съемки для контроля отслоения композита от поверхности бетона при нагружении усиленных железобетонных балок // Научные труды Общества железобетонщиков Сибири и Урала: материалы 14-й Сибирской (международной) конференции по железобетону, 2016. С. 69–75.
3. Окольников Г.Э., Куликова К.П., Бочукова М.И., Краюшкина Е.О. Актуальность применения внешнего армирования с использованием композитных материалов // Системные технологии. 2023. № 2(47). С. 93–100. DOI: 10.55287/22275398_2023_2_93.
4. Xiangbo Xu, Bo Ran, Nan Jiang, Lei Xu, Pan Huan, Xianwei Zhang, Zhe Li A systematic review of ultrasonic techniques for defects detection in construction and building materials // Measurement. 2024. Vol. 226. № 114181. DOI: doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114181.
5. Руководство по усилению железобетонных конструкций композиционными материалами. М.: НИИЖБ, 2006. 48 с.
6. СП 164.1325800.2014 Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами. Правила проектирования.
7. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами. М.: Стройиздат, 2004. 144 с.
8. Корнюхин А.В., Баишева Д.Р. Усиление строительных конструкций композитными материалами по технологии внешнего армирования. // Современные научные исследования и инновации. 2020. № 1 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2020/01/91252> (дата обращения: 23.02.2024).
9. Антоненко А.А. Сцепление композитных материалов с бетоном при внешнем усилении конструкции // Строительство. Архитектура. Дизайн: материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. Курский государственный университет. 2020. С. 9–13.
10. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Фролов К.Е. Методика расчета на прочность нормальных сечений железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, усиленных внешним армированием на основе углеродных материалов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2017. Т. 18, № 1. С. 20–28.
11. Римшин В.И., Меркулов С.И. К вопросу усиления железобетонных конструкций внешним армированием композитным материалом // Вестник ТГАСУ. 2018. Т. 20, № 5. С. 92–100.
12. Гусев Б.В., Будадин О.Н., Федотов М.Ю., Козельская С.О., Шелемба И.С. Опыт мониторинга технического состояния и усиления поврежденных строительных конструкций полимерными композиционными материалами // Вопросы оборонной техники. Научно-технический сборник. Серия 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 2020. № 3–4. С. 85–94.
13. Yang M., Xu H. Application of fiber Bragg grating sensing technology and physical model in bridge detection // Results in Physics. 2023. Vol. 54. P. 107058. DOI: 10.1016/j.rinp.2023.107058.
14. Alwis L., Bremer K., Roth B. Fiber optic sensors embedded in textile-reinforced concrete for smart structural health monitoring: a review // Sensors. 2021. Vol. 21. Issue 15. P. 4948. DOI: 10.3390/s21154948.
15. Лапшинов А.Е. Обследование и контроль качества конструкций, армированных и усиленных композитными полимерными материалами // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: материалы VIII международной научно-практической конференции, 2017. С. 129–135.
16. Гизатулин Р.Р. Применение углеволокна в строительстве // Новые технологии - нефтегазовому региону: материалы Международной научно-практической конференции. Отв. ред. П.В. Евтин. 2018. С. 45–48.
17. Квирквелия Г.З. Применение композитных материалов на основе углеволокна в строительстве // Синергия Наук. 2019. № 31. С. 945–953.
18. Дьяков А.В. Применение углеволокна в строительстве. армирование и усиление несущих конструкций // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2020. № 2. С. 322–324.
19. Петров А.Е., Петренева О.В. Целесообразность использования композитных материалов при усилении железобетонных колонн // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2018. Т. 2. С. 71–78.
20. Побегайлов О.А., Агафонов А.В., Ганус Е.К. Организационно-технологические особенности использования армированного расширяющегося бетона // Инженерный вестник Дона. 2020. № 3 (63). С. 36.
21. Столяров О.Н., Ольшевский В.Я., Донцова А.Е., Демидова Ю.А. Углеродные волокна в строительстве мостов // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2019. № 3 (78). С. 36–49. DOI: 10.18720/CUBS.78.3.
22. Петропавловских О.К., Ахметов А.А. Усиление автомобильных мостов углеволокном // Техника и технология транспорта. 2019. № 1 (28).

23. Куанышев Б.М., Квашин М.Я. Оценка эффективности усиления конструкций железнодорожных мостов композитным материалом // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2016. № 1 (51). С. 238–244.
24. Томилов С.Н. Особенности деформаций главных балок железобетонных пролетных строений автодорожных мостов при их усилении внешней арматурой // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2020. № 3 (44). С. 151–158.
25. Iakovenko I., Kolchunov V., Lymar I. Rigidity of reinforced concrete structures in the presence of different cracks. MATEC Web of Conferences. 2017, vol. 116, 02016. DOI: doi.org/10.1051/matecconf/20171160201.
26. Леонович С.Н., Снежков Д.Ю., Будревич Н.А. Анализ эхо-импульсного метода контроля буронабивных свай // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2021. № 3 (48). С. 74–82. DOI 10.24866/2227-6858/2021-3-9.
27. Недавний О.И., Смокотин А.В., Богатырева М.М., Протасова И.Б. Опыт применения эхо-импульсного метода при неразрушающем контроле бетона несущих конструкций // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 1 (48). С. 140–147.
28. Углова Е.В., Еганян Г.В. Вибродиагностика мостовых сооружений на автомобильных дорогах // Молодой исследователь Дона. 2021. № 2(29).
29. Сагайдак А.И. Перспективные направления применения метода акустической эмиссии в строительстве // Строительные материалы. 2018. № 11. С. 3–7. DOI 10.31659/0585-430X-2018-765-11-3-7.

References

1. Vanus D.S., Pobudilina A.A. [Design of reinforced concrete structures with composite materials based on carbon fiber] // *Perspektivy nauki* [Perspectives of Science]. 2021;11(146):67–71. (in Russ.)
2. Bykov A.A., Shardakov I.N., Shestakov A.P. [Using the infrared imaging method to control the detachment of the composite from the concrete surface when loading reinforced concrete beams]. In: *Nauchnyye trudy Obshchestva zhelezobetonshchikov Sibiri i Urala: materialy 14-y Sibirskoy (mezhdunarodnoy) konferentsii po zhelezobetonu (Novosibirsk, 18–19 fevralya 2016 goda)* [Scientific papers of the Society of Reinforced Concrete Workers of Siberia and the Urals: materials of the 14th Siberian (International) Conference on Reinforced Concrete (Novosibirsk, February 18-19, 2016)]. Novosibirsk: Siberian State University of Railway Engineering; 2016, vol. 12, pp. 69–75. (in Russ.)
3. Okolnikova G.E., Kulikova K.P., Bochukova M.I., Krayushkina E.O. The relevance of the application of external reinforcement using composite materials. *System Technologies*. 2023;2(47):93–100. (in Russ.) DOI: 10.55287/22275398_2023_2_93.
4. Xiangbo Xu, Bo Ran, Nan Jiang, Lei Xu, Pan Huan, Xianwei Zhang, Zhe Li. A systematic review of ultrasonic techniques for defects detection in construction and building materials. *Measurement*. 2024;226:114181. DOI: doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114181
5. *Rukovodstvo po usileniyu zhelezobetonnykh konstruksiy kompozitsionnymi materialami* [Guidelines for strengthening reinforced concrete structures with composite materials] Moscow: NIIZhB; 2006. 48 p. (in Russ.)
6. *SP 164.1325800.2014. Usileniye zhelezobetonnykh konstruksiy kompozitsionnymi materialami. Pravila proyektirovaniya*. [Set of Rules 164.1325800.2014. Loads and impacts]. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia, 2014. 76 p. (in Russ.)
7. Shilin A.A., Pshenichny V.A., Kartuzov D.V. *Usileniye zhelezobetonnykh konstruksiy kompozitsionnymi materialami* [Strengthening reinforced concrete structures with composite materials]. Moscow: Stroyizdat Publ.; 2004. 144 p. (in Russ.)
8. Korniyukhin A.V., Baisheva D.R. *Usileniye stroitel'nykh konstruksiy kompozitnymi materialami po tekhnologii vneshnego armirovaniya. Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii* [Strengthening building structures with composite materials using external reinforcement technology. Modern scientific research and innovation] 2020;1 [Electronic resource]. Available at: <https://web.snauka.ru/issues/2020/01/91252> (accessed: 02/23/2024). (in Russ.)
9. Antonenko A.A. Adhesion of composite materials to concrete with external reinforcement of the structure. In: *Stroitel'stvo. Arkhitektura. Dizayn: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchennykh, Kursk, 24 aprelya 2020 goda*. [Construction. Architecture. Design: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Kursk, April, 24, 2020]. Kursk: Kursk State University, 2020. P. 9–13. (in Russ.)
10. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Frolov K.E. Methodology for strength analysis of normal cross-sections of reinforced concrete hydraulic structures strengthened with carbon composite materials. *Rudn journal of engineering research*. 2017;18(1):20–28. (in Russ.) DOI: 10.22363/2312-8143-2017-18-1-20-28

11. Rimshin V.I., Merkulov S.I. External reinforcement of concrete structures using composite materials. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. English version appendix*. 2018;20(5):92–100. (in Russ.) DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-5-92-100
12. Gusev B.V., Budadin O.N., Fedotov M.Yu., Kozelskaya S.O., Shelemba I.S. [Experience in monitoring the technical condition and strengthening of damaged building structures with polymer composite materials] *Vo-prosy oboronnoy tekhniki. Nauchno-tekhnicheskiy sbornik. Seriya 15. Kompozitsionnyye nemetallicheskiye materialy v mashinostroyenii* [Questions of defense technology. Scientific and technical collection. Series 15. Composite non-metallic materials in mechanical engineering], 2020;3–4: 85–94. (in Russ.)
13. Yang M., Xu H. Application of fiber Bragg grating sensing technology and physical model in bridge detection. *Results in Physics*. 2023;54:107058. DOI: 10.1016/j.rinp.2023.107058.
14. Alwis L., Bremer K., Roth B. Fiber optic sensors embedded in textile-reinforced concrete for smart structural health monitoring : A review. *Sensors*. 2021;21(15):4948. DOI: 10.3390/s21154948.
15. Lapshinov, A.E. [Inspection and quality control of structures reinforced and reinforced with composite polymer materials]. In: *Obsledovaniye zdaniy i sooruzheniy: problemy i puti ikh resheniya: Materialy VIII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Sankt-Peterburg, 13 oktyabrya 2017 goda)* [Inspection of buildings and structures: problems and ways to solve them: materials of the VIII international scientific and practical conference (St. Petersburg, October 13, 2017)], St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2017. P. 129–135. (in Russ.)
16. Gizatulin R.R. [Application of carbon fiber in construction] In: *Novyye tekhnologii – neftegazovomu regionu: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Tyumen', 17–18 maya 2018 goda)* [New technologies for the oil and gas region: Materials of the International Scientific and Practical Conference (Tyumen, May 17–18, 2018)], Tyumen: Tyumen Industrial University, 2018. P. 45–48. (in Russ.)
17. Kvirkvelia G.Z. [Application of carbon fiber-based composite materials in construction] *Synergy of Science*. 2019;31:945–953. (in Russ.)
18. Dyakov A.V. Application of carbon fiber in construction. reinforcement and strengthening of load-bearing structures. *Nauka. Tekhnika. Tekhnologii (politeknicheskiy vestnik)* [Science. Technic. Technologies (Polytechnic Bulletin)]. 2020;2:322–324. (in Russ.)
19. Petrov A.E., Petrenea O.V. The expediency of using composite materials in reinforcing reinforced concrete columns. *Sovremennyye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika* [Modern technologies in construction. Theory and practice]. 2018;2:71–78. (in Russ.)
20. Pobegailov O.A., Agafonov A.V., Ganus E.K. Organizational and technological features of the use of reinforced expanding concrete // *Engineering journal of Don*. 2020;3(63):36. (in Russ.)
21. Stolyarov O.N., Olshevsky V., Dontsova A.E., Demidova Yu.A. Carbon fibers in bridge construction // *Construction of unique buildings and structures*. 2019. No. 3 (78). pp. 36-49. (in Russ.) DOI: 10.18720/CUBS.78.3.
22. Petropavlovskikh O.K., Akhmetov A.A. Strengthening automobile bridges with carbon fiber // *Construction of unique buildings and structures*. 2019;3(78):36–49. (in Russ.) DOI 10.18720/CUBS.78.3
23. Kuanyshev B.M., Kvashnin M.Ya. [Evaluation of the effectiveness of strengthening railway bridge structures with composite material] *The herald of Kyrgyz state university of construction, transport and architecture named after N.Isanov*. 2016;1(51):238–244. (in Russ.)
24. Tomilov S.N. Features of deformation of the main beams of reinforced concrete spans of motor road bridges strengthened with external reinforc. *Vestnik Inzhenernoy shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta* [Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University]. 2020;3(44):151–158. (in Russ.)
25. Iakovenko I., Kolchunov V., Lymar I. Rigidity of reinforced concrete structures in the presence of different cracks. *MATEC Web of Conferences*. 2017;116:02016. DOI: doi.org/10.1051 /mateconf /20171160201.
26. Leonovich S., Snezhkov D., Budrevich N. Research of the echo-impulse method of control of drilled pieces. *Vestnik Inzhenernoy shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta* [Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University]. 2021;3(48):74-82. (in Russ.) DOI 10.24866/2227-6858/2021-3-9.
27. Nedavny O.I., Smokotin A.V., Bogatyreva M.M., Protasova I.B. Pulse-echo technique used at non-destructive testing of concrete supporting constructions. *Vestnik tomского gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Journal of construction and architecture*. 2015;1(48):140–147. (in Russ.)
28. Uglova E.V., Eganyan G.V. Vibration-based diagnostics of bridge constructions on highways. *Young Don Researcher*. 2021;2(29):59–63. (in Russ.)
29. Sagaidak A.I. [Promising directions for using the acoustic emission method in construction]. *Stroitel'nye Materialy* [Construction materials]. 2018;11:3–7. (in Russ.) DOI 10.31659/0585-430X-2018-765-11-3-7.

Информация об авторах:

Морозова Юлианна Андреевна, аспирант кафедры технологий строительства и конструкционных материалов, Российский университет дружбы народов им. П. Лумумбы, Москва, Россия; juliaandreeva99@mail.ru

Окольникова Галина Эриковна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительства и конструкционных материалов, Российский университет дружбы народов им. П. Лумумбы, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия; okolnikova_ge@mail.ru

Information about the authors:

Yulianna A. Morozova, Postgraduate at the Department of Construction Technologies and Structural Materials; RUDN University, Moscow, Russia; juliaandreeva99@mail.ru

Galina E. Okolnikova, PhD (Eng.), Associate Professor, Department Construction Technologies and Structural Materials, RUDN University, Moscow, Russia; Professor, Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia; okolnikova_ge@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.05.2024, принята к публикации 27.05.2024.

The article was submitted 20.05.2024, approved after reviewing 27.05.2024.