

Анкерные жгуты в составе системы внешнего армирования железобетонных конструкций композитными материалами

С.А. Матвеюшкин, П.А. Воронков, М.Ф. Мессауди

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный
Университет, Москва*

Аннотация: В статье рассматривается применение углеродных анкерных жгутов для усиления строительных конструкций. Описаны их конструктивные особенности, технологии монтажа и ключевые преимущества, включая малый вес, высокую прочность, коррозионную устойчивость и долговечность. Приведен обзор существующих экспериментов, демонстрирующих надежность анкерных жгутов при нагрузках, их эффективность в предотвращении расслоения элементов внешнего армирования и увеличении прочности соединений. Указаны недостатки нормативной базы, отсутствие практических рекомендаций по подбору и проектированию анкерных жгутов. Авторы подчеркивают необходимость дальнейших исследований для оптимизации взаимодействия элементов системы «усиленная конструкция-внешнее армирование-анкер».

Ключевые слова: Анкерный жгут, углеродное волокно, несущая способность, усиление конструкций, совместная работа.

Введение:

При выполнении усиления эксплуатируемых железобетонных конструкций зданий и сооружений необходимо обеспечить механическую безопасность и надежность конструктивных систем. Одним из оптимальных методов усиления является применение композиционных материалов на основе углеродного волокна, отличающихся повышенной прочностью, деформативностью в сочетании с малым удельным весом и упрощенной технологией монтажа [1]. В то же время для эффективного использования систем усиления требуется обеспечить их совместную работу с основным бетоном конструкции. Одним из перспективных методов является применение композиционных анкерных жгутов, обеспечивающих восприятие расчетных усилий.

Результаты и обсуждения:

Усиление конструкций при использовании углепластиковых композитных материалов заключается в их креплении к наружной поверхности конструкции специальными адгезивными/клеевыми составами: к растянутому элементу симметрично относительно продольной оси или к растянутой части изгибаемого элемента [2]. В случае недостаточности восприятия усилия применяется дополнительное закрепление элемента усиления анкерными жгутами.

Углеродный анкерный жгут (далее – анкерный жгут, жгут, анкер) это жгут, изготовленный по технологии вязального плетения из высокопрочных углеродных нитей, используемый как конструктивный или анкерный элемент при усилении и ремонте различных конструктивных элементов. Жгуты состоят из множества тонких волокон углерода, объединённых в нити и пропитанных полимерной матрицей (чаще всего это эпоксидные или виниловые смолы). Волокна углерода имеют диаметр от 5 до 10 микрон и формируются путём высокотемпературной обработки исходных органических материалов, таких как полиакрилонитрил (PAN) или смолы на основе нефти. На этапе производства происходит их графитизация, что обеспечивает высокую прочность и термостойкость. Такая многослойная структура позволяет равномерно распределять нагрузку вдоль всей длины жгута и предотвращает концентрацию напряжений в одном месте.

Применение анкерных жгутов направлено на:

- обеспечение распределения растягивающих усилий через элементы усиления (углехолст);
- обеспечение восприятия растягивающих и поперечных сил в системе внешнего армирования;
- повышение несущей способности узлов сопряжения конструкций за счет обеспечения совместной работы системы внешнего армирования с усиливаемой конструкцией.

Анкерные жгуты могут применяться при усилении внешним армированием бетонных и железобетонных, каменных и армокаменных конструкций.

Процесс монтажа анкерных жгутов по рекомендации производителя [3] должен происходить следующим образом:

- В конструкции выбуривается отверстие диаметром на 4 мм больше диаметра анкерного жгута;
- Выполняется зенковка проделанного отверстия с катетами 10-20 мм (рис. 1) для исключения образования уплотнений и повреждений волокна жгутов;

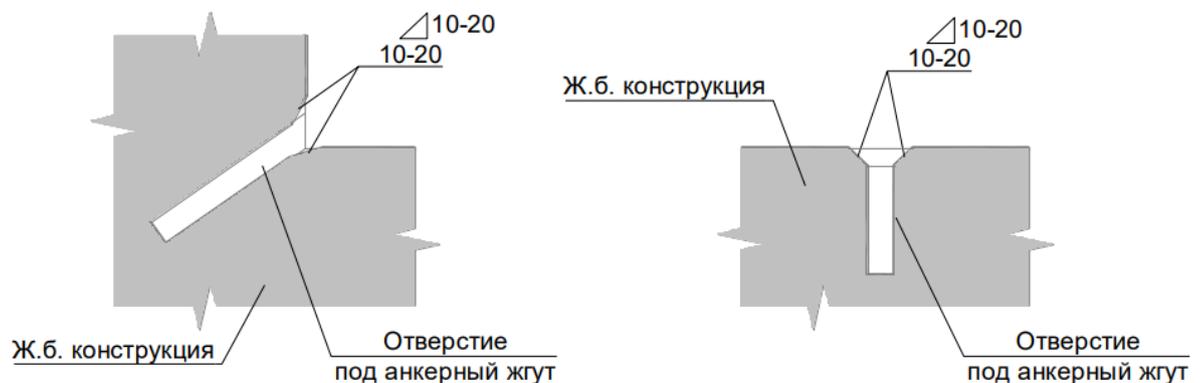


Рис. 1. – Устройство отверстия для установки анкерных жгутов [3].

- Подготовленное отверстие продувается «грушей» или специальным пистолетом для устранения бетонной пыли и достижения наиболее ровной поверхности. Непрочный материал конструкции удаляется щеткой;

- Анкерный жгут монтируется в подготовленное отверстие посредством использования установочной спицы или стержня. Установка жгута производится на двухкомпонентный эпоксидный клей с предварительной пропиткой той части жгута, которая монтируется в конструкцию.

Рекомендуется [3] использовать минимальную глубину заделки жгута в конструкцию равную 10 диаметрам данного жгута, но не менее 100 мм. Длина выпуска под элемент усиления - минимум 150 мм (рис. 2). Угол заделки в

конструкцию определяется по индивидуальному проекту. Пример типового узла устройства анкерного жгута в конструкцию представлен на рис. 2.

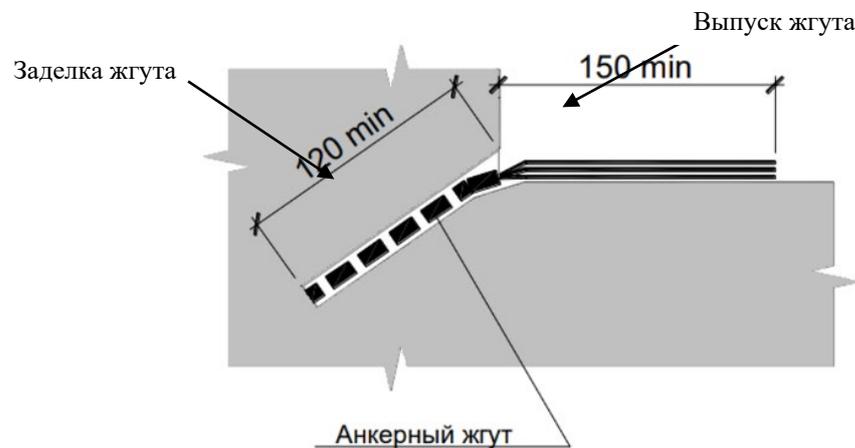


Рис. 2. – Устройство анкерного жгута в подготовленном отверстии [3].

При установке жгутов в отверстия на потолочных или иных поверхностях, откуда возможно вытекание клеевого состава, рекомендуется использовать более густой эпоксидный клей.

Сопряжение выпуска анкерного жгута с элементом усиления имеет два исполнения: венчик жгута «в лапу» или венчик жгута в «звездочку» (рис. 3). Венчиком жгута называют ту его часть, которая соединяется с элементом усиления.

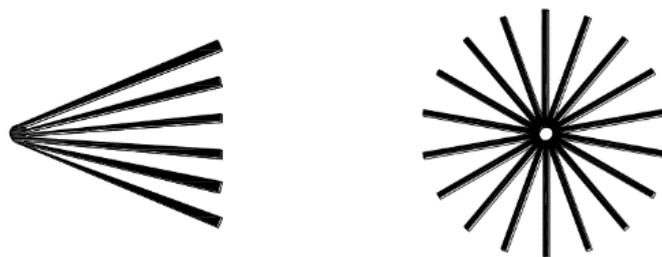


Рис. 3. – Формы сопряжения анкерных жгутов с элементами усиления [3].

Анкеровка жгута с элементами усиления имеет различную конфигурацию. Может быть односторонней или сквозной, в одном или двух направлениях элементов усиления, в один или два и более слоёв усиления. Наиболее распространенные варианты анкеровки представлены на рисунках 4 – 10.

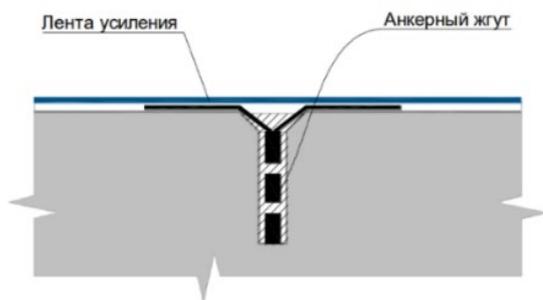


Рис. 4. – Односторонняя анкеровка внешнего армирования в одном направлении элементов усиления в один слой; венчик в лапу или в звездочку [3].

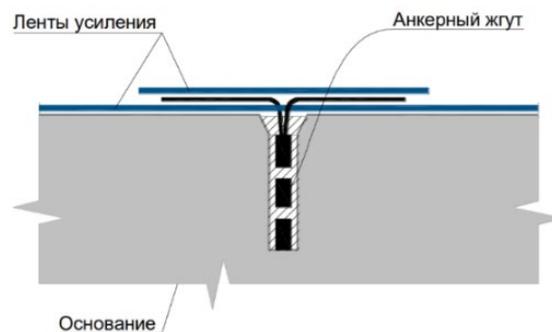


Рис. 5. – Односторонняя анкеровка внешнего армирования в двух направлениях элементов усиления в один слой или в одном направлении в два и более слоев; венчик в звездочку [3].

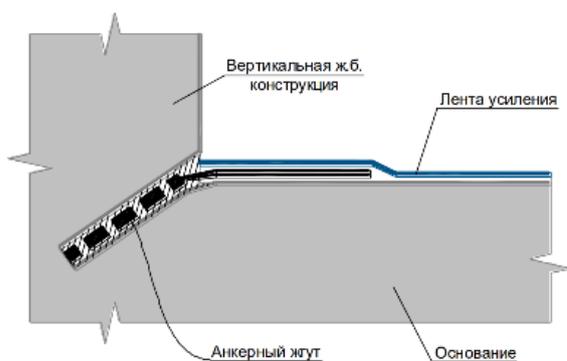


Рис. 6. – Анкеровка внешнего армирования в 1 слой; венчик в лапу [3].

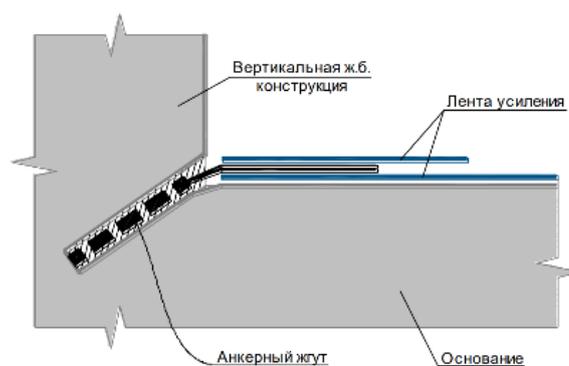


Рис. 7. – Анкеровка внешнего армирования в двух направлениях или в одном направлении в два и более слоя; венчик в лапу [3].

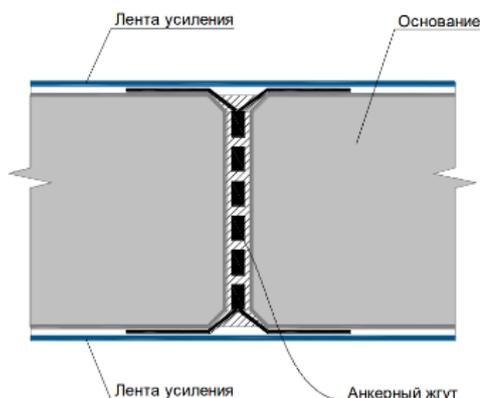


Рис. 8. – Сквозная анкеровка двух-стороннего внешнего армирования в одном направлении в один слой; венчик в лапу или в звездочку [3].

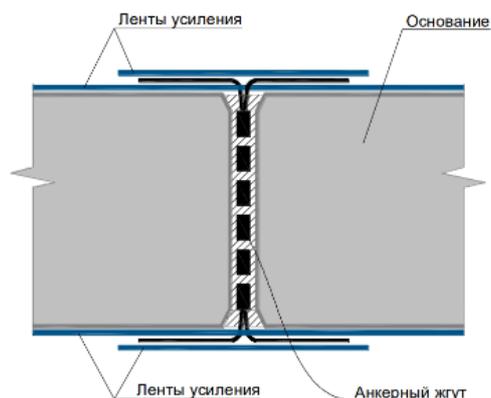


Рис. 9. – Сквозная анкеровка двух-стороннего внешнего армирования в двух направлениях в один слой или в одном направлении в два и более слоев; венчик в звездочку [3].

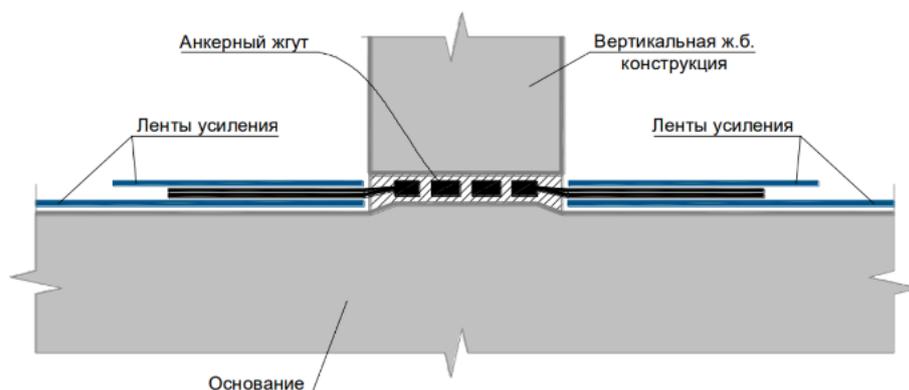


Рис. 10 – Сквозная анкеровка внешнего армирования в двух направлениях или в одном направлении в два и более слоев; венчик в лапу [3].

Предложенная технология монтажа в первую очередь определяется конструктивными (отверстия, диаметры, углы и т.п.) и технологическими (монтажными) требованиями к установке анкерных жгутов.

Главным преимуществом применения углеродных анкерных жгутов является:

- Малый удельный вес: углеродные волокна значительно легче стали (в 4-5 раз), что уменьшает общий вес конструкции при сохранении её прочностных характеристик;

- Легкость монтажа;
- Модуль упругости: углеродное волокно обладает высоким модулем упругости (около 230-600 ГПа), что обеспечивает малую деформацию под нагрузкой;
- Устойчивость к усталостным нагрузкам: углеродные жгуты способны выдерживать длительные циклические нагрузки, что делает их идеальными для применения в динамически нагруженных конструкциях;
- Возможность применения для различных типов конструкций (бетонные, железобетонные, каменные и армокаменные конструкции);
- Устойчивость к ультрафиолетовому излучению: материалы на основе углеродного волокна более устойчивы к деструкции под воздействием ультрафиолета;
- Коррозионная устойчивость: в отличие от стали, углеродные волокна не подвергаются коррозии в агрессивных средах, что увеличивает срок службы конструкций.

В работах [4, 5], исследовано поведение углеродных жгутов на вырыв и срез в системах внешнего армирования, получены следующие результаты:

- Испытания анкеров на вырыв показали, что на несущую способность углеродных анкеров существенное влияние оказывают такие параметры, как диаметр анкера и отверстия, глубина анкеровки и прочность основания. Несущая способность представляет собой комплексный показатель, интегрирующий влияние этих факторов.
 - Для исследованных серий образцов характерен пластический характер разрушения тела анкера (с заметными деформациями) и разрушение бетона с образованием конусообразного разрушения. Образцы, у которых произошло хрупкое разрушение анкеров, предложено исключить из анализа, так как причиной их разрушения был не осевой характер нагрузки. Таким образом, анкерные жгуты демонстрируют надежное поведение под нагрузкой, проявляя пластические деформации и избегая хрупкого разрушения.
-

- Экспериментально зафиксированы значительные деформации анкеров; относительная деформация, в зависимости от диаметра анкера и примененного связующего, достигала 10 %.

Исследование анкеров на срез [5] показало, что наиболее уязвимой зоной углеродного анкера является место его перегиба на выходе из бетона к началу наклейки на ламель. Разброс усилий на срез при схожих условиях может объясняться качеством подготовки отверстий, включая раззенковку, а также возможным влиянием острых краев отверстий на несущую способность анкера.

В работе [6] показано, что анкерные жгуты из углеволокна эффективны в предотвращении расслоения углеволоконных ламелей за счет снижения концентрации напряжений на концах закреплений.

В работе [7] сформирована база данных испытаний анкерных жгутов для разработки моделей, позволяющих прогнозировать прочность на вырыв. Хотя эти модели полезны для оценки прочности собственно анкерного крепления, их применение в проектировании системы усиления затруднено, поскольку взаимодействие между элементами усиления (углехолст, ламель) и закрепленным анкером не было исследовано путем проведения натуральных экспериментов.

В работе [8, 9] исследована совместная работа жгута и внешнего армирования. Результаты показали, что установка одного анкера в среднем увеличивает прочность соединения на 53% по сравнению с контрольными образцами без анкеров. В данном исследовании также была представлена концепция гибких и жестких анкеров. В первом случае не применялась пропитка эпоксидной смолой волокон анкера в области изгиба, чтобы соединение обеспечивало значительное проскальзывание элементов внешнего армирования. Результаты экспериментов в целом подтвердили это утверждение. Соединения, с использованием жестких анкеров, пропитанных эпоксидной смолой, как правило, демонстрировали более высокую прочность, но были более измен-

чивы и менее устойчивыми к деформациям. В результате чего было установлено, что предпочтение следует отдавать гибким анкерам, без пропитки мест изгиба смолой.

В работе [10] выполнен обзор конструктивных решений анкерования систем внешнего армирования при усилении конструкции и отмечено отсутствие практических рекомендаций по применению различных типов анкеров.

Основными производителями углеродных анкерных жгутов в Российской Федерации являются ООО «Нанотехнологический центр композитов», АО «Препрег-Современные Композиционные Материалы», за рубежом - Sika AG (Швейцария), Fyfe Co (Австралия), Hexcel Corporation (США).

Применение углеродных анкерных жгутов регламентируется различными стандартами и нормативными документами. В Российской Федерации основным документом является СП 164.1325800.2014 «Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования», в котором установлены основные требования к проектированию систем внешнего армирования углеволокнистыми материалами.

Разработаны стандарты организаций (СТО), в которых устанавливаются общие требования к проведению работ по усилению конструкций углеродным волокном, требования к оборудованию, приспособлениям, инструменту и материалам, используемым в технологическом процессе, последовательность выполнения отдельных технологических операций, включая приемы выполнения отдельных видов работ, требования к технологическим режимам, методы контроля качества работ и материалов, а также требования безопасности и охраны окружающей.

В альбомах технических решений производителей (ООО «НЦК», АО «Препрег-СКМ») углеродных анкерных жгутов собраны типовые узлы усиления систем внешнего армирования различных строительных конструкций, отражены особенности конструирования и принципиальные технические решения анкерования элементов усиления систем внешнего армирования.

АО «Препрег-СКМ» [3] разработана инструкция по подбору анкерных жгутов, где также установлены расчетные требования к их установке. Документ представляет расчетные формулы, с помощью которых можно подобрать необходимый анкер для железобетонной конструкции с учетом его диаметра, площади поперечного сечения, предела прочности и модуля упругости при растяжении. Рассматривается подбор на растягивающие силы (N_{ult}), на действие поперечных сил (Q_{ult}) и на их совместное действие:

$$\frac{N}{N_{ult}} + \frac{Q}{Q_{ult}} \leq 1$$

Следует отметить, что в предложенных рекомендациях определяется предельное усилие, воспринимаемое анкерным жгутом, но отсутствуют указания каким образом определять усилие от внешнего воздействия (нагрузки).

Согласно СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения», расчет изгибаемых бетонных элементов следует производить из условия:

$$M \leq M_{ult},$$

где M – изгибающий момент от внешней нагрузки;

M_{ult} – предельный изгибающий момент, который может быть воспринят сечением элемента:

$$M_{ult} = R_b \cdot b \cdot x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} \cdot A's \cdot (h_0 - a')$$

Расчет по прочности сечений изгибаемых элементов (СП 164.1325800.2014), усиленных внешним армированием из композитных материалов, следует проводить из условия (6.5), где M_{ult} определяется по (6.6).

$$M_{ult} = R_b \cdot b \cdot x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} \cdot A's \cdot (h_0 - a') + R_f \cdot A_f \cdot a$$

Исходя из расчетных положений (СП 164.1325800.2014) совместная работа системы «элемент усиления-внешнее армирование» безусловно обеспечивается соблюдением всех требований, включая конструктивные, связанные с обеспечением анкеровки внешнего армирования за счет заведения элементов

усиления в сжатую зону (неразрезные элементы) или в зону, где действующие усилия не приводят к образованию трещин (свободно опертые элементы) или предлагается устройство дополнительных механических креплений. При этом отсутствуют рекомендации по подбору и конструированию таких креплений.

Заключительная часть:

- В настоящее время определены параметры прочности (деформативности) единичного анкера (или анкеров разных типов), полученные экспериментально или гарантированные производителем, исследовано поведение анкера в зоне непосредственного контакта с внешним элементом усиления при различных воздействиях;

- Нормативная документация по проектированию усиления железобетонных конструкций композитными материалами содержит указания о необходимости анкеровки элементов внешнего армирования в растянутых зонах, но отсутствуют практические рекомендации по подбору и конструированию анкерного узла;

- Конструктивные требования к установке анкерных углеродных жгутов от производителей определяются параметрами самого жгута и технологическими (монтажными) особенностями их установки без учета совместной работы анкера в системе внешнего армирования.

Таким образом, для повышения надежности и эффективности конструктивных решений из углеродных волокон в системах внешнего армирования необходимы дальнейшие экспериментальные исследования в направлении изучения действительной работы анкерных креплений. Авторами данной статьи планируется серия экспериментальных исследований по изучению совместной работы внешнего армирования с учетом анкерных жгутов в составе системы «усиленная конструкция-внешнее армирование-анкер/жгут».

Литература

1. А.И. Соловьёва, С.В. Георгиев, З.А. Меретуков Углеродное волокно - как хороший материал для усиления железобетонных конструкций // Инженерный вестник Дона. 2021. №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7231.
2. Д.Р.Маилян, Михуб Ахмад, П.П.Польской Вопросы исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных различными видами композитных материалов // Инженерный вестник Дона. 2013. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1674
3. АО «Препрег-СКМ». Инструкция по подбору анкерных жгутов Fibarm Anchor, С. 3-12.
4. Симаков О.А., Зенин С.А., Кудинов О.В., Осипов П.В. Работа на вырыв анкеров на основе углеродных волокон при устройстве систем внешнего армирования // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 3. С. 29-34. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.29-34.
5. Симаков О.А., Зенин С.А., Кудинов О.В., Осипов П.В. Работа на срез анкеров на основе углеродных волокон при внешнем армировании // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 9. С. 59-64. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.09.59-64.
6. Piyong, Y., Silva, P. F., & Nanni, A. (2003). Flexural strengthening of concrete slabs by a three-stage prestressing FRP system enhanced with the presence of gfrp anchor spikes. Proceedings of the International Conference Composites in Construction (CCC2003), С. 239–244.
7. Kim, S. J., & Smith, S. T. (2010). Pullout strength models for FRP anchors in uncracked concrete. Journal of Composites for Construction, ASCE, 14(4), p. 406–414.
8. Zhang, H. W., Smith, S. T., & Kim, S. J. (2010). Optimisation of carbon and glass FRP anchor design. Construction and Building Materials, 32, p. 1–12.

9. Zhang, H. W., & Smith, S. T. (2012). FRP-to-concrete joint assemblages anchored with multiple FRP anchors. *Composite Structures*, 94(2), p. 403–414.
10. Цапина О.Е., Шеховцов А. С. Способы анкеровки внешнего армирования при усилении железобетонных конструкций // Молодой ученый. - 2024. - № 20 (519). - С. 87-91.

References

1. Solov'yova A.I., Georgiev S.V., Meretukov Z.A. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2021. №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7231.
2. Mailyan D.R., Mihub Ahmad, Pol'skoj P.P. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2013. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1674.
3. АО «Prepreg-SKM». *Instruktsiya po podboru ankernykh zhgutov Fibarm Anchor*, p. 3-12.
4. Simakov O.A., Zenin S.A., Kudinov O.V., Osipov P.V. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo*. 2019. № 3. p. 29-34. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.29-34.
5. Simakov O.A., Zenin S.A., Kudinov O.V., Osipov P.V. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo*. 2019. № 9. pp. 59-64. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.09.59-64.
6. Piyong, Y., Silva, P. F., & Nanni, A. (2003). Flexural strengthening of concrete slabs by a three-stage prestressing FRP system enhanced with the presence of gfrp anchor spikes. *Proceedings of the International Conference Composites in Construction (CCC2003)*, pp. 239–244.
7. Kim, S. J., & Smith, S. T. (2010). Pullout strength models for FRP anchors in uncracked concrete. *Journal of Composites for Construction, ASCE*, 14(4), pp. 406–414.
8. Zhang, H. W., Smith, S. T., & Kim, S. J. (2010). Optimisation of carbon and glass FRP anchor design. *Construction and Building Materials*, 32, pp. 1–12.



9. Zhang, H. W., & Smith, S. T. (2012). FRP-to-concrete joint assemblages anchored with multiple FRP anchors. Composite Structures, 94(2), pp. 403–414.
10. Tsarina O.E., Shekhovtsov A. S. Molodoy uchenyj. 2024. № 20 (519). pp. 87-91.

Дата поступления: 10.12.2024

Дата публикации: 26.01.2025