

Исследование методов усиления конструкций, находящихся под нагрузкой, используемых в зарубежной практике

Б.К. Джамуев, Р.И. Билимготов, Р.Т. Атабиев

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: В статье систематизированы методы усиления по принципу действия и применяемым материалам, также выявлены ключевые тенденции: доминирование технологий на основе композитных материалов внешнего армирования, активное развитие гибридных систем. Разработана классификационная схема, позволяющая обоснованно выбирать метод усиления в зависимости от технического состояния конструкции и требуемого результата. В статье доказана высокая эффективность композитных материалов для повышения прочности и сейсмостойкости при минимальном увеличении массы сечения. Определено, что традиционные методы (железобетонные обоймы, торкретирование) сохраняют актуальность при необходимости значительного увеличения жесткости. Сформулированы перспективные направления для внедрения: адаптация зарубежных нормативов, разработка отечественных аналогов высокоэффективных композитов, создание цифровых моделей усиления.

Ключевые слова: усиление конструкций, эксплуатационная нагрузка, колонны, композитные материалы, углеволокно, сейсмостойкость, торкретирование, стальные обоймы, фибробетон, гибридное армирование.

Введение

Мировой строительный фонд характеризуется значительной долей зданий и сооружений, эксплуатирующихся вне их первоначального проектного срока. Одновременно с этим происходит ужесточение нормативных требований, особенно в области сейсмостойкости, что вынуждает проводить мероприятия по повышению несущей способности существующих конструкций. Особую важность приобретают технологии, позволяющие проводить работы без остановки эксплуатации объекта и полной разгрузки элементов, к которым относятся и колонны, как ключевые несущие элементы зданий. Зарубежный опыт, в частности, американский (ACI), европейский (Eurocode) и азиатский, демонстрирует опережающее развитие в области методов усиления, что делает их изучение и адаптацию исключительно актуальными для российской строительной науки и практики.

За объект исследования приняты колонны, а предметом является иностранный опыт усиления колонн.

Авторами в качестве гипотезы утверждается, что существует противоречие между необходимостью повышения несущей способности колонн и невозможностью их полной разгрузки и остановки эксплуатации. Это накладывает специфические ограничения на применяемые технологии, требуя от них не только эффективности, но и применимости в условиях действующих нагрузок, технологичности, минимального воздействия на геометрические параметры конструкций.

Цель: Описать и систематизировать зарубежные методы усиления железобетонных колонн, работающих под нагрузкой, и оценить возможности расширения их применения в России.

Задачи:

1. Проанализировать зарубежный теоретический и практический опыт, эксперименты и исследования.
2. Провести сравнительный анализ эффективности, ограничений и области применения каждого метода.
3. Выявить перспективные тенденции и оценить возможности их применения в России.

В исследовании применялись методы системного анализа зарубежной нормативной базы (ACI, Eurocode, fib Bulletins), научно-технической литературы и реализованных проектов. Проведен сравнительный анализ на основе критериев "эффективность–трудоемкость–стоимость–применимость", а также методы сравнения, сопоставления и синтеза.

Для расчета колонн предлагается использовать методику предельных значений. Для решения проблем отсутствия экспериментальных и теоретических исследований, посвященные проблеме усиления колонн композитными материалами, систематизированные иностранные

публикации, которые будут способствовать разработке предварительного варианта нормативного документа по применению композитов для усиления колонн.

Теоретические аспекты и классификация методов усиления колонн

Методы усиления можно классифицировать по нескольким признакам: принципу работы (пассивное и активное усиление), используемым материалам (сталь, бетон, композиты), способу взаимодействия с существующей конструкцией (внешнее армирование, увеличение сечения). Наиболее наглядной является классификация по применяемым материалам и технологиям.

Методы	Технологии	Принцип действия
Усиление композитными материалами	Наружное оклеивание углеродным волокном, стеклопластиком, композитными лентами	Восприятие растягивающих или сжимающих усилий, поперечное обжатие для повышения прочности и пластичности
Усиление бетоном	Установка железобетонных обойм, торкретирование	Увеличение площади сечения, совместная работа с исходной конструкцией
Усиление стальными элементами	Стальные обоймы из прокатных листов или профилей	Восприятие нагрузки стальным каркасом, разгрузка существующей колонны
Комбинированные методы	Комбинации различных материалов	Синергетический эффект от сочетания материалов

Источник: составлено авторами

Зарубежные исследования уделяют значительное внимание не только экспериментальной проверке методов, но и разработке точных расчетных моделей. Например, в работах зарубежных ученых предлагается использовать "метод деформаций" для расчета несущей способности колонн коробчатого сечения с учетом второго порядка, позволяющий избежать сложных итерационных расчетов и использовать для практических целей номограммы. Подобные теоретические наработки критически важны для обоснованного проектирования усиления [1-3].

Важным аспектом перед выбором метода усиления является оценка технического состояния конструкции. В зарубежной практике, как и в российских нормативных документах, используется классификация технического состояния конструкций по категориям.

1. Исправное состояние. Конструкции полностью соответствуют проектным требованиям, дефекты отсутствуют или минимальны.

2. Работоспособное состояние. Конструкции выполняют функции, но имеют незначительные дефекты, не требующие немедленного вмешательства.

3. Ограниченно работоспособное состояние. Конструкции имеют дефекты, которые требуют контроля, защитных мероприятий или усиления.

4. Недопустимое состояние. Конструкции не обеспечивают требуемую несущую способность, эксплуатация ограничена.

5. Аварийное состояние. Конструкции представляют опасность, их эксплуатация запрещена [4].

Анализ зарубежных методов усиления колонн

Ниже изложены методы на основе композитных материалов.

Это одно из самых динамично развивающихся направлений в мировой практике. Его суть заключается в наружном оклеивании колонн

высокопрочными тканями или ламелями на основе углеродных, стеклянных или арамидных волокон, связанных полимерной матрицей.

При работе на сжатие с изгибом ламели, установленные в растянутой зоне, воспринимают растягивающие усилия. Однако наиболее эффективным для колонн является поперечное обжатие путем сплошной обмотки колонны композитной тканью. Создаваемое обоймой давление аналогично действию поперечной арматуры, что значительно повышает прочность бетона на сжатие и, что особенно важно, его пластичность, что критично для сейсмических воздействий.

Проведенные численные эксперименты с использованием современного программного обеспечения демонстрируют различное поведение колонн, усиленных разными типами арматуры. Колонны, полностью армированные стекловолокном, демонстрируют стальное циклическое поведение без снижения несущей способности, в то время как традиционные сталежелезобетонные колонны показывают спад нагрузки после пика. Гибридные колонны (со стальной и стекловолоконной арматурой) занимают промежуточное положение, сочетая прочность и устойчивость [5].

Согласно исследованиям, несущая способность колонн, усиленных углеволокном, может увеличиваться на 57% и более. В предельном состоянии осевое сжатие колонн может достигать 11 мм/м, хотя в стадии эксплуатации такие деформации недопустимы. Таким образом, ткани из углеродистого волокна применяются при околопредельном нагружении колонн для обеспечения необходимого коэффициента надежности. Для нагруженных колонн рекомендованный максимальный коэффициент усиления составляет 1,8–2,0 [5].

Традиционные методы увеличения сечения:

1. Железобетонные обоймы: Данный метод предполагает устройство по периметру существующей колонны дополнительного арматурного каркаса с последующей установкой опалубки и бетонированием. Основное преимущество – значительное увеличение не только прочности, но и жесткости сечения. Ключевой задачей является обеспечение надежного сцепления нового бетона со старым, для чего производится тщательная насечка поверхности, а новая арматура анкерится в существующем бетоне с помощью химических анкеров [6].

2. Торкретирование: Технология позволяет наносить бетонную или растворную смесь на подготовленную поверхность под давлением. Это обеспечивает высокую плотность и прочность наносимого слоя, а также отличное сцепление с основанием. Метод особенно эффективен для усиления колонн сложной формы и при ремонте поврежденных бетонных поверхностей. В зарубежной практике широко применяется торкретирование с использованием высокоэффективных бетонов, включая фибробетон, что дополнительно повышает прочностные характеристики усиленного сечения.

Методы с использованием стального проката:

1. Стальные обоймы: Усиление производится путем установки стальных листов или прокатных профилей (уголков, швеллеров) по периметру колонны. Зазор между стальной обоймой и бетоном заполняется цементно-песчаным раствором или безусадочным бетоном, обеспечивая совместную работу. Метод надежен и позволяет существенно увеличить несущую способность, но имеет существенный недостаток – подверженность стали коррозии, что требует проведения дополнительных защитных мероприятий.

В зарубежной практике часто применяются предварительно напряженные стальные обоймы, которые не только увеличивают сечение, но и создают дополнительное обжатие существующего бетона, повышая его

прочность на сжатие. Также используются стальные обоймы с заполнением самоуплотняющимися бетонными смесями, что обеспечивает качественное заполнение зазора без необходимости вибрирования [7].

Специализированные и гибридные методы:

1. Гибридное армирование: Перспективным направлением является комбинирование в одной конструкции стальной и композитной арматуры. Сталь, имеющая выраженный предел текучести, обеспечивает пластичность, а композитная арматура, обладающая высокой прочностью, увеличивает общую несущую способность и ограничивает развитие трещин. Исследования показывают, что такая гибридизация позволяет расширить зону пластического шарнира в колоннах при сейсмических воздействиях [8].

2. Применение фибробетона: В зарубежной практике активно развивается технология усиления конструкций с использованием фибробетона. Установлено, что скорость коррозии арматуры в нем примерно в два раза ниже, чем в обычном бетоне, благодаря низкой проницаемости материала. Это открывает возможности для использования его в качестве защитного и усиливающего слоя в агрессивных средах.

3. Системы внешнего предварительного напряжения: Данная технология широко применяется за рубежом для усиления конструкций, включая колонны. Суть метода заключается в установке внешних напрягаемых элементов (стальных канатов, стержней или FRP-ламелей), которые создают дополнительное обжатие конструкции, компенсируя часть эксплуатационных нагрузок [9].

Сравнительный анализ эффективности и ограничений методов

Из выше перечисленного, авторы делают вывод, что не существует универсального решения. Выбор метода зависит от конкретной инженерной задачи. Использование композитных материалов незаменимо там, где критически важно минимальное увеличение массы и сечения, а также

требуются высокие темпы производства работ (например, усиление колонн в действующих учреждениях или исторических зданиях). Их высокая коррозионная стойкость делает их идеальными для объектов с агрессивной средой. Железобетонные обоймы и торкретирование остаются оптимальным выбором при необходимости кардинального увеличения жесткости колонны и в случаях, когда требуется повышенная огнестойкость. Стальные обоймы – проверенное решение для быстрого и надежного усиления, однако требуют постоянного контроля и защиты от коррозии [10].

Перспективные тенденции и возможности применения в России

Наиболее очевидным и перспективным направлением является активное внедрение методов усиления на основе композитных материалов. Для этого необходима разработка и внедрение отечественных нормативных документов (аналогов ACI 440), регламентирующих проектирование, производство работ и контроль качества. Параллельно следует стимулировать развитие производства отечественных материалов из углеродного волокна и стеклопластика для снижения стоимости технологий.

Совместное использование традиционных и инновационных методов может дать синергетический эффект. Например, для колонн, требующих значительного увеличения несущей способности и жесткости, может применяться железобетонная обойма с последующим наружным армированием композитной тканью для повышения сейсмической стойкости и долговечности. Как отмечается в исследованиях, комбинированное использование цементации и оклеивания углеволокном не только усиливает колонну, но и защищает ее от природного воздействия [11].

Опыт применения фибробетона за рубежом демонстрирует его колоссальный потенциал не только для новых конструкций, но и для ремонта и усиления, из-за этого его можно охарактеризовать как высокоэффективный материал. Исследования в области коррозионной стойкости фибробетона

указывают на его целесообразность для усиления опор мостов, морских сооружений и других объектов, подверженных воздействию хлоридов.

Заключение

Проведенное исследование позволило систематизировать и проанализировать современные зарубежные методы усиления железобетонных колонн, находящихся под нагрузкой.

Установлено, что зарубежная практика демонстрирует четкий тренд в сторону использования высокоэффективных композитных материалов, которые обеспечивают значительное повышение прочности и пластичности колонн при минимальном изменении их геометрии и массы. Эффективность этих методов подтверждена многочисленными исследованиями и практическим опытом.

Выявлено, что традиционные методы (железобетонные обоймы, торкретирование) не утратили своей актуальности и остаются оптимальным решением для случаев, когда требуется значительное увеличение жесткости сечения и обеспечение высокой огнестойкости.

Приведены тезисы в пользу гибридных подходов, сочетающих преимущества разных материалов и технологий, что позволяет достигать требуемых результатов с максимальной эффективностью. Комбинирование цементации с оклеиванием углеволокном демонстрирует особую эффективность для колонн с износом.

Определены основные барьеры для внедрения передовых зарубежных методик в России: отсутствие развитой нормативной базы для FRP-усиления, недостаточный опыт применения и высокая стоимость импортных материалов.

Сформулированы перспективные направления развития, среди которых ключевыми являются: разработка отечественных нормативных документов, развитие производства композитных материалов, интеграция систем

мониторинга и подготовка квалифицированных кадров. Особое внимание следует уделить адаптации проверенных российских методов диагностики и классификации износа в сочетании с современными технологиями усиления.

Внедрение рассмотренных передовых зарубежных практик в отечественное строительство позволит не только эффективно и экономично решать задачи реконструкции, но и существенно повысить сейсмическую устойчивость и общую безопасность строительного фонда России. Дальнейшие исследования следует направить на экспериментальную проверку эффективности различных методов усиления в специфических российских условиях и разработку соответствующих нормативных документов.

Литература

1. ACI 440.2R-17 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. – American Concrete Institute, 2017. URL: preprints.org/frontend/manuscript/613e0b2d46c89ce04da67021f6747336/download_pub.
2. fib Bulletin 90. Externally applied FRP reinforcement for concrete structures. – International Federation for Structural Concrete, 2019. URL: biblio.ugent.be/publication/8657278.
3. CAN/CSA S806-12 Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers. – Canadian Standards Association, 2012. URL: mdpi.com/1996-1944/16/5/1990.
4. Рекомендации по усилению и ремонту строительных конструкций инженерных сооружений. Москва. ЦНИИпромзданий. 1997. 128 с.
5. Цветкова М. Ю. Подходы к усилению железобетонных колонн при реконструкции каркасных зданий повышенной пожароопасности. Молодой ученый. 2025. №1 (552). С. 19-26.

6. Mohamed A., Ragab A. " Repair And Strengthening of R.C .Structures(Evaluation – Solutions)". Report, Structural Engineering Department, Faculty of Engineering, Ain-Shams University, 2010. URL: academia.edu/33530699/State_of_the_Art_Review_Strengthening_of_Reinforced_Concrete_Structures_Different_Strengthening_Techniques#:~:text=1.,the%20main%20tenance%20and%20repair%20needs.

7. Cozmanciuc C., Oltean R., Munteanu V. "Strengthening Techniques of RC Columns using Fiber Reinforced Polymeric Materials". bulletin of Polytechnic Institute of Iasi, Building &architecture Section, Technical University "Gheorghe Asachi" Iasi Tome LVI (LIX). Fascia. 3. Romania, 2009. P. 85-92.

8. Rizkalla S., Hassan T., Hassan N. "Design recommendations for the use of FRP for reinforcement and strengthening of concrete structures". Structural Engineering and Materials, Volume 5. Issue 1. January/March 2003. P. 16-28.

9. Motavalli M., Czaderski C. Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research. " FRP Composites for Retrofitting of Existing Civil Structures in Europe :State-of-the-Art Review". Composites & Polycon 2007, American Composites Manufacturers Association, Tampa, FL USA, October 17-19, 2007. URL: C:/Users/1/Downloads/COMPOSITES_POLYCON_2007_Numerical_Modeling_of_Simu.pdf.

10. Попов В.М., Яцковец О.А., Влияние изменчивости деформационных характеристик бетона на обеспеченность несущей способности изгибаемых железобетонных элементов в условиях низких температур. Инженерный вестник Дона № 11, 2025. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2025/10495.

11. Хузин А.Ф., Богданов Р.Р., Мавлюбердинов А.Р., Технология устройства монолитных плит перекрытия с пустотобразователями при

реконструкции объекта исторического наследия. Инженерный вестник Дона № 11, 2025. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2025/10495.

References

1. ACI 440.2R-17 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. American Concrete Institute, 2017. URL: preprints.org/frontend/manuscript/613e0b2d46c89ce04da67021f6747336/download_pub.

2. fib Bulletin 90. Externally applied FRP reinforcement for concrete structures. International Federation for Structural Concrete, 2019. URL: biblio.ugent.be/publication/8657278.

3. CAN/CSA S806-12 Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers. Canadian Standards Association, 2012. URL: mdpi.com/1996-1944/16/5/1990.

4. Rekomendatsii po usileniyu i remontu stroitel'nykh konstruktсий inzhenernykh sooruzheniy [Recommendations for strengthening and repair of engineering structures]. Moskva. TSNIIpromzdaniy. 1997. 128 p.

5. Tsvetkova M. Podkhody k usileniyu zhelezobetonnykh kolonn pri rekonstruktsii karkasnykh zdaniy povyshennoy pozharoopasnosti. Molodoy uchenyy. 2025. № 1 (552). pp. 19-26.

6. Mohamed A., Ragab A. "Repair And Strengthening of R.C Structures (Evaluation – Solutions)". Report, Structural Engineering Department, Faculty of Engineering, Ain-Shams University, 2010. URL: academia.edu/33530699/State_of_the_Art_Review_Strengthening_of_Reinforced_Concrete_Structures_Different_Strengthening_Techniques#:~:text=1.,the%20main%20tenance%20and%20repair%20needs.

7. Cozmanciuc C., Oltean R., Munteanu V. "Strengthening Techniques of RC Columns using Fiber Reinforced Polymeric Materials". bulletin of Polytechnic

Institute of Iasi, Building & architecture Section, Technical University "Gheorghe Asachi" Iasi Tome LVI (LIX). Fascia. 3. Romania, 2009. pp. 85-92.

8. Rizkalla S., Hassan T., Hassan N. "Design recommendations for the use of FRP for reinforcement and strengthening of concrete structures". Structural Engineering and Materials, Volume 5. Issue 1. January/March 2003. pp. 16-28.

9. Motavalli M., Czaderski C. Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research. «FRP Composites for Retrofitting of Existing Civil Structures in Europe: State-of-the-Art Review". Composites & Polycon 2007, American Composites Manufacturers Association, Tampa, FL USA, October 17-19, 2007. URL: C:/Users/1/Downloads/COMPOSITES_POLYCON_2007_Numerical_Modeling_of_Simu.pdf.

10. Popov V.M., Yatskovets O.A., Inzhenernyj vestnik Dona 2025, № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2025/10495.

11. Khuzin A.F., Bogdanov R.R., Mavlyuberdinov A.R. Inzhenernyj vestnik Dona, 2025, № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2025/10495.

Авторы согласны на обработку персональных данных

Дата поступления: 10.10.2025

Дата публикации: 27.11.2025