

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 624.012.41

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-69-77>

Методы усиления железобетонных колонн с помощью углеродного волокна в Китае

Чэ Сяньюй

Шаньдунский транспортный университет, Китайская народная республика, провинция Шаньдун,
г. Цзинань

✉ chexiangyu003@163.com



EDN: UGUUOC

Аннотация

Введение. Строительная отрасль Китая в настоящее время стремительно развивается. Первый пик пришёлся на 1950-е годы, а второй — на 1980-е и 1990-е годы. В целом, здания, построенные в период строительного бума, характеризовались относительно низкими стандартами проектирования и строительства, что приводило к низкому качеству. В настоящее время здания, построенные в течение первого и второго этапов, вступают в фазу «старения» из-за таких факторов, как низкие стандарты строительства и устаревшие методы строительства. Как сами здания, так и их конструкции являются несовершенными. Со временем большинство зданий демонстрируют различную степень старения и серьёзные повреждения, требующие срочной диагностики, ремонта и укрепления. Для удовлетворения потребностей социального развития необходимо проводить надлежащий ремонт, укрепление и реконструкцию существующих зданий. Цель настоящего исследования: выявление возможностей усиления дефектных строительных конструкций современными композитными материалами, производимыми в Китае.

Материалы и методы. Объектом исследования являются методы усиления железобетонных столбов. Автор предлагает использовать системный подход, учитывающий прилегающие функциональные зоны, их взаимовлияние и экспертную оценку значимости.

Результаты исследования. Анализ показал, что механизм армирования железобетонных колонн, подвергающихся осевому сжатию и армируемых листами из углеродного волокна, представляет собой комбинацию листов из углеродного волокна и бетона, на которую влияют множество факторов. Метод армирования строго регламентирован, а боковое ограничение, обеспечиваемое листами из углеродного волокна при нагружении, может повысить прочность на сжатие, структурную устойчивость и долговечность колонн.

Обсуждение и заключение. Методы укрепления существующих зданий разнообразны, с уникальными преимуществами и ограничениями, например: метод приклеивания стали быстр в строительстве, но требует высокого качества; метод увеличения сечения экономичен, но сокращает пространство; метод укрепления углеродным волокном обладает множеством преимуществ, но имеет недостатки в исследовании узлов и расчете несущей способности, хотя исследование укрепления арматурно-бетонных осевых сжатых столбов достаточно глубокое и эффект зависит от многих факторов. Обсуждение показывает: выбор метода укрепления должен учитывать реальные условия; метод укрепления углеродным волокном требует дальнейших исследований, а укрепление осевых сжатых столбов — оптимизации технологии, при этом существующие стандарты и нормативы нужно пересмотреть с учетом новых достижений и практики.

Ключевые слова: строительные конструкции, метод усиления углеродной тканью, армирование железобетонных конструкций

Для цитирования: Чэ Сяньюй. Методы усиления железобетонных колонн с помощью углеродного волокна в Китае. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(4):69–77. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-69-77>

Methods for Strengthening Reinforced Concrete Columns Using Carbon Fiber in China

Che XiangYu 

Shandong Jiaotong University, Jinan, Shandong Province, China

 chexiangyu003@163.com

Abstract

Introduction. China's construction industry developed in three phases: the first peak occurred in the 1950s, and the second one in the 1980s and 1990s. Generally, buildings constructed during the construction boom were characterized by relatively low design and construction standards resulting in poor quality. Currently, buildings constructed during the first and second phases are entering a phase of "aging" due to some factors such as low construction standards and outdated construction methods. Both the buildings themselves and their structures are flawed. Over time, most buildings exhibit varying degrees of deterioration and serious damage requiring urgent inspection, repair, and reinforcement. To meet the needs of social development, proper repair, reinforcement, and reconstruction of existing buildings is essential. The aim of this study is to identify the possibilities of reinforcing defective building structures with modern composite materials manufactured in China.

Materials and Methods. The object of the research are methods of strengthening reinforced concrete pillars. The author suggests using a systematic approach that accounts for the adjacent functional areas, their mutual influence and an expert assessment of their significance.

Research Results. The analysis showed that the strengthening mechanism for reinforced concrete columns subjected to axial compression and strengthened with carbon fiber sheets is a combination of carbon fiber sheets and concrete influenced by a host of factors. The strengthening method is strictly regulated, and the lateral restraint provided by the carbon fiber sheets under loading is capable of improving the compressive strength, structural stability, and durability of the columns.

Discussion and Conclusion. The strengthening methods for existing buildings vary widely, each with its own unique advantages and limitations. For example, bonded steel is fast to construct but requires a high quality; section enlargement is cost-effective but reduces space; carbon fiber strengthening offers numerous advantages but has limitations in investigating nodes and calculating load-bearing capacity. Although extensive research has been conducted on strengthening reinforced concrete axial compressed columns, the effectiveness depends on a host of factors. The discussion demonstrates that the choice of a strengthening method should be tailored to actual conditions. Carbon fiber strengthening requires further research, while strengthening axial compressed columns requires technological optimization. Furthermore, existing standards and regulations should be revised to reflect new advances and best practices.

Keywords: building structures, carbon fiber strengthening method, strengthening of reinforced concrete structures

For citation: Che XiangYu Methods for Strengthening Reinforced Concrete Columns Using Carbon Fiber in China. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(4):69–77. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-69-77>

Введение. Укрепление зданий подразумевает усиление изношенных и поврежденных конструктивных материалов и строительных конструкций для восстановления их функциональности. По сравнению с новым строительством, проекты по ремонту и усилению существующих строительных конструкций обладают преимуществами более коротких сроков строительства, меньших инвестиционных затрат и более высокой окупаемости. Ожидается, что сектор укрепления и реконструкции зданий в Китае будет переживать значительный рост в будущем [1–2]. Поэтому исследования и практическое использование теории и технологий укрепления и реконструкции зданий представляют значительную теоретическую и инженерную ценность.

Материалы и методы. В последние годы Китай добился значительного прогресса как в теоретических исследованиях, так и в инженерных разработках в области реконструкции и усиления существующих зданий. Появляется всё больше методов усиления существующих зданий и сооружений, особенно в широко используемых бетонных конструкциях. Появилось множество основных методов усиления. Рассмотрим некоторые из них.

1. Приклеивание стальных элементов. Этот метод заключается в креплении стальных пластин к внешней поверхности бетонных элементов для повышения их прочности на изгиб и сдвиг, тем самым повышая их безопасность. Он обычно подходит для среды с влажностью 20 % и используется для армирования изгибаемых элементов, подверженных воздействию обычных статических сил [3]. По сравнению с крупномасштабным строительством он характеризуется небольшим периодом строительства, минимальным объемом работ на площадке и минимальным воздействием на внешний вид существующих элементов здания и пространства над ним. Однако этот метод требует высокого качества строительства, а выбор клеевого материала и мастерство строителей напрямую

определяют его эффективность. Кроме того, если после склеивания стальных элементов образуются пустоты, их устранение крайне затруднено.

2. Увеличение поперечного сечения. Этот метод заключается в увеличении площади поперечного сечения бетонных элементов для повышения их несущей способности и соответствия эксплуатационным требованиям. Он отличается относительно низкой стоимостью строительства и широким спектром применения, включая армирование и модернизацию различных конструктивных элементов (балки, плиты, колонны и стены) [4]. Однако его основными недостатками являются длительное время строительства на месте, значительное воздействие на окружающую среду и сокращение полезной площади из-за увеличения площади поперечного сечения, что накладывает определенные ограничения.

3. Внешнее стальное армирование. Этот метод заключается в обертывании поверхности бетонного элемента электросварными стальными профилями (доступными как для сухого, так и для мокрого способа) для повышения несущей способности элемента. Этот метод значительно повышает несущую способность и жесткость элемента, относительно прост в изготовлении и требует коротких сроков строительства, что делает его широко используемым для усиления строительных элементов [5]. Однако внешнее стальное армирование имеет и недостатки, такие как большой расход стали, высокая стоимость и сложность обработки стыков элементов.

4. Армирование путем изменения расчетной схемы. Этот метод изменяет передачу усилий в конструкции путем добавления опорных точек, балок (раскосов) или преобразования многопролетных балок с простыми опорами в неразрезные. Это значительно снижает расчетный изгибающий момент, увеличивает несущую способность элемента конструкции и достигает цели усиления исходной конструкции. В зависимости от способа добавления опорных точек соединение может быть классифицировано как «мокрое» или «сухое». При использовании мокрого соединения контактные поверхности между балкой и опорой, а также бетоном, отлитым после заливки, в точках опоры требуют придания шероховатости, удаления окалины и смачивания. Для заливки обычно используется микрорасширяющийся бетон. При использовании сухих соединений стальных хомутов между стальным хомутом и поверхностью балки заливается цементный раствор. После того, как стальной хомут надежно приварен к опоре, все зазоры между контактами герметизируются и заполняются сухим прочным раствором. Метод включает в себя как дополнительное армирование опоры, так и подкрепление, которые используются совместно. Дополнительное армирование опоры усиливает конструкцию за счет добавления несущих опорных элементов. Несмотря на простоту принципа и надежность передачи усилий, он трудоемок и может повлиять на эстетику и функциональность здания, особенно на пространственное смещение. Он больше подходит для усиления конструкций с ограниченными зазорами и большими пролетами. Комплексный метод армирования можно разделить на частичное усиление, полное усиление и усиление фундамента. Усиление достигается за счёт изменения пути передачи усилий и повышения несущей способности и деформационной способности конструкции. Метод также включает в себя такие способы, как удаление балочных (ферменных) стен, удаление балочных колонн, замена балочных колонн и модификация несущей системы [6]. Он включает в себя усиление конструкции, подъём домкратами и коррекцию выравнивания надстройки, а также удаление отбракованных компонентов. Этот метод характеризуется коротким сроком строительства, низкой стоимостью и минимальным влиянием на производство и повседневную жизнь. Он подходит для решения таких задач по усилению, как увеличение полезной площади и обеспечение безопасности конструкции как в новых, так и в существующих зданиях.

5. Предварительно напряжённая арматура. Предварительно напряжённую арматуру можно разделить на два типа в зависимости от цели армирования. Один из них — предварительно напряжённая арматура стяжками, которая в основном используется для усиления балочно-плитных конструкций, каркасных конструкций, ферм и элементов, подверженных значительному внецентренному сжатию. В зависимости от назначения армирования и требований к нагрузке усиливаемой конструкции расположение стяжек можно разделить на горизонтальное (или линейное), подкрепляющее (или ломаное) и смешанное. Другой метод — предварительно напряжённая арматура, которая в основном используется для колонн каркаса, подверженных осевому сжатию и небольшому внецентренному сжатию. Армирование двойной арматурой подходит для усиления элементов, сжатых в осевом направлении, и колонн, подверженных небольшому внецентренному сжатию, в то время как одинарная арматура подходит для усиления колонн, подверженных большому внецентренному сжатию, с недостаточным количеством сжатой арматуры или низкой прочностью. Этот метод использует предварительно напряжённые стальные стержни (горизонтальные стержни, поддерживающие поперечные элементы, подпорные стержни и комбинированные стержни) для усиления несущей способности конструкции. Данный метод позволяет снизить уровень напряжений в армированных элементах, что приводит к значительному повышению эффективности армирования и значительному увеличению общей несущей способности конструкции. Этот метод может так же повлиять на внешний вид армированных элементов. Он больше подходит для армирования средне- и большепролетных конструкций, а также эффективен для усиления высоконапряжённых и деформируемых бетонных элементов [7]. Однако

его не следует применять в конструкциях, подверженных повышенной усадке и ползучести бетона, при этом необходимо уделять пристальное внимание коррозии предварительно напряженных арматурных стержней.

6. Метод армирования склеиванием листов из углеродного волокна. Этот метод использует специальный клей для приклеивания листов из углеродного волокна к поверхности компонента, образуя композитный материал. Этот композитный материал взаимодействует с исходной конструкцией или компонентом, усиливая и улучшая его несущую способность. Этот метод обладает такими преимуществами, как малый вес, уменьшенная толщина, доступность материалов по спецификациям и устойчивость к щелочам, коррозии и кислотам. Малый вес и простота технологического процесса позволяют использовать его в ограниченном пространстве. Кроме того, усиление не влияет на нормальное использование здания, что делает его простым, быстрым и широко применимым.

Ещё в конце XIX века технология склеивания армирующей ткани из углеродного волокна получила широкое применение в развитых странах, таких как США и Япония. С момента её появления в Китае в конце 1990-х годов она быстро привлекла внимание инженерной отрасли и стала центром исследований и применения новых материалов для армирования зданий. Сегодня значительное количество ранее построенных зданий не соответствует новым эксплуатационным требованиям, имеет низкие проектные стандарты, низкую функциональность и нуждается в срочном усилении. Приклеивание материалов из углеродного волокна для армирования бетонных конструкций является наиболее удобным и эффективным методом армирования, не требующим остановки производства. Он особенно подходит в ситуациях, когда площадь поперечного сечения существующих конструктивных элементов не может быть увеличена, пространство на строительной площадке ограничено, а сроки строительства сжаты. Кроме того, этот метод подходит для армирования мостов, водопропускных труб и различных других бетонных конструкций. Однако в теоретических исследованиях и инженерном применении современного метода армирования с помощью клеевого углеродного волокна всё ещё существует ряд проблем, требующих решения. Что касается свойств материала, листы из углеродного волокна, используемые для армирования, обычно имеют толщину менее 0,2 мм, но обладают высокой прочностью на разрыв, превышающей 3000–4000 МПа, что примерно в 10 раз превышает прочность конструкционной стали. Поэтому они особенно подходят для армирования железобетонных элементов, подверженных как изгибу, так и растяжению. Однако для армирования широкого спектра сжимающих элементов необходимы дальнейшие исследования механизмов армирования и методов применения листов из углеродного волокна. Таким образом, для удовлетворения требований по армированию и модернизации большого количества существующих зданий исследования напряженно-деформированного состояния и методов армирования сжимающих элементов листами из углеродного волокна имеют важное теоретическое и прикладное значение [8].

В связи с непрерывным развитием технологий армирования углеродным волокном в Китае официально опубликован «Технический кодекс по армированию бетонных конструкций листами из углеродного волокна» CECS 146:2003 (издание 2007 г.), и опубликован соответствующий комплект чертежей для армирования конструкций. Этот кодекс в полной мере учитывает новейшие результаты исследований, проведенных многочисленными отечественными университетами и научно-исследовательскими институтами за последние годы, интегрируя ценный практический опыт, накопленный различными организациями в области использования материалов из углеродного волокна для армирования конструкций при проектировании и строительстве. Он также опирается на обширную международную литературу, предоставляя научное и авторитетное руководство по теоретическим исследованиям и инженерной практике применения армированных углеродным волокном бетонных конструкций.

В целом, использование клееных листов из углеродного волокна для армирования бетонных конструкций привело к многочисленным достижениям как в теоретических исследованиях, так и в инженерном применении. Однако остается еще множество теоретических проблем и технических трудностей, которые необходимо преодолеть. Например, недостаточно изучены механизм работы и конкретные методы применения клееного армирования углеродным волокном в стыках компонентов, а система анализа и расчета несущей способности нуждается в совершенствовании. В частности, в области армирования сжатых элементов, хотя действующий «Технический кодекс для железобетонных конструкций с листами из углеродного волокна» CECS 146:2003 (издание 2007 г.) четко устанавливает, что использование листов из углеродного волокна для армирования бетонных колонн может ограничить деформацию бетона, тем самым увеличивая прочность на сжатие и снижая коэффициент осевого сжатия, текущие исследования остаются недостаточными и неполными [10]. В нормативных актах подчеркивается, что эффект армирования листами из углеродного волокна может учитываться при проектировании только при наличии надежных доказательств [9]. Поэтому для дальнейшего расширения сферы применения армирования листами из углеродного волокна и повышения эффективности его армирования особенно актуально и необходимо проведение более глубоких и систематических исследований существующих теоретических и технических вопросов.

Проанализируем механизм армирования и методы возведения железобетонных колонн, работающих на осевое сжатие и армированных листом из углеродного волокна.

1. Теоретический анализ элементов, работающих на осевое сжатие.

Элемент, работающий на осевое сжатие, воспринимает осевое усилие вдоль оси своего центра тяжести поперечного сечения, когда точка приложения внешней силы, действующей на элемент, совпадает с центром тяжести поперечного сечения элемента, а распределение напряжений по поперечному сечению элемента равномерно.

При разрушении элемента, работающего на осевое сжатие, направление усилия совпадает с осью элемента. Как правило, когда железобетонная колонна подвергается осевому сжатию, хомуты ограничивают боковое расширение и деформацию бетона внутри неё, оказывая боковое сжатие на бетон ядра. Совместное воздействие различных вертикальных осевых давлений и небольшого начального эксцентриситета сжимает весь ствол колонны, вызывая сжатие и деформацию стальных стержней, что приводит в предельной стадии к текучести внутренних стальных стержней. Из-за выпячивания стальной арматуры на бетонной поверхности ствола колонны появляются трещины, которые становятся более выраженными по мере увеличения нагрузки. После того как стальная арматура выходит из строя, несущая способность элемента оказывается недостаточной, и трещины на поверхности бетона в конечном итоге приводят к полному разрушению.

2. Анализ напряжений при осевом сжатии элементов, армированных углеродной тканью.

Характеристики элементов при осевом сжатии, армированных углеродной тканью, существенно отличаются от характеристик неармированных элементов.

После армирования осевого сжатого элемента углеродной тканью он становится структурой, подверженной вторичным напряжениям. До нанесения углеродной ткани осевой сжатый элемент находился под напряжением (первичное напряжение), то есть в нем возникали напряжения и деформации. Однако вновь наклеенная углеродная ткань в этот момент не испытывает напряжений. Только при приложении испытательной нагрузки (вторичное напряжение) новая часть углеродной ткани, соединенная с бетоном, начинает подвергаться напряжению. Следовательно, напряжение и деформация вновь добавленной детали из углеродного волокна всегда отстают от накопленных напряжений и деформаций исходного компонента. Когда несущая способность исходного компонента достигает предела, вновь добавленная углеродная ткань еще не достигла предельного состояния несущей способности, и ее прочность на разрыв может продолжать играть свою роль.

Степень разгрузки исходного компонента и обработка новых и старых поверхностей соединения являются двумя важными факторами, влияющими на совместную работу усиленного компонента.

Чтобы уменьшить проблему запаздывания напряжений и деформаций вновь добавленной детали из углеродного волокна, компонент необходимо разгрузить перед усилением. При разрушении усиленного компонента усиленная часть может уменьшить накопленные напряжения и деформации, которые отстают от исходного компонента. На начальном этапе несущей способности разгрузка оказывает большее влияние на эффективность усиления компонента. Существуют два конкретных метода разгрузки: прямая разгрузка и косвенная разгрузка. Прямая разгрузка подразумевает полное или частичное снятие нагрузки с компонента, в то время как косвенная разгрузка подразумевает приложение противодействующей силы к существующей конструкции для снятия накопленных напряжений и деформаций на начальном этапе нагрузки.

3. Обработка границы раздела между новым и старым армированными компонентами.

Обработка границы раздела и качество связи между листом углеродного волокна и исходным компонентом напрямую влияют на конечный эффект армирования. Сжимающие и сдвиговые напряжения между новой и старой конструкциями передаются через границу, поэтому граница раздела должна быть гладкой и ровной. Для изучения прочности связи между листом углеродного волокна и исходной конструкцией лист углеродного волокна сначала приклеивают к образцу бетона, а затем проводят испытание на сдвиг. Это позволяет проанализировать влияние на прочность связи таких факторов, как обработка поверхности, связующий материал и прочность бетона. Углеродная ткань обладает чрезвычайно высокой прочностью на разрыв. Поперечная ткань из углеродного волокна в аксиально сжатых элементах не только координирует деформацию с хомутами в аксиально сжатых элементах, но и работает совместно с продольной тканью из углеродного волокна, выполняя функцию обруча, повышая несущую способность аксиально сжатых элементов.

4. Механизм напряжения в аксиально сжатых элементах, армированных листами из углеродного волокна.

Когда бетон в аксиально сжатой колонне подвергается воздействию сжимающих усилий в нескольких направлениях, его объем изменяется. Это происходит из-за постепенного изменения напряжений и деформаций в бетоне, приводящего к образованию мелких трещин. Приложение бокового давления к поверхности бетона в этот момент может ограничить скорость изменения этих мелких трещин, тем самым увеличивая несущую способность бетона. Если бетонная поверхность обернута стальной трубой или другой оболочкой в форме обруча, расширение объема бетона ограничивается боковой силой, прикладываемой оболочкой, тем самым уменьшая или

замедляя скорость изменения напряжений и деформаций в бетоне, что в конечном итоге позволяет повысить прочность бетона на осевое сжатие и улучшить его пластичность. Этот принцип широко используется в практическом применении в инженерном армировании, например, в трубобетоне. Такой тип материала, который оптимизирует собственные механические свойства бетона и повышает его прочность на осевое сжатие за счет приложения боковых усилий к бетонной поверхности, называется бетоном с ограниченным пространством. Если сборная оболочка, передающая боковые усилия к бетонной поверхности, изготовлена из углеродной ткани, она считается бетоном с ограниченным пространством.

Были проведены исследования методов армирования железобетонных колонн, работающих на осевое сжатие, углеродной тканью. При использовании углеродной ткани для армирования бетонных конструкций существует три распространенных метода армирования: мокрое связывание, непрерывная намотка волокон и сборные оболочки. Конкретный процесс строительства с применением углеродной ткани заключается в следующем:

- 1) подготовка поверхности крепления бетонной колонны для увеличения площади контакта;
- 2) нанесение металлической сетки для повышения прочности бетонной колонны;
- 3) заливка бетона в зазоры между металлической сеткой для усиления конструкции;
- 4) обертывание полиэтиленовой пленкой для сохранения влаги и предотвращения растрескивания;
- 5) разрезание листа углеродного волокна;
- 6) подготовка и нанесение клея, наклейка листа (после завершения крепления необходимо дождаться затвердения клеевого соединения);
- 7) проведение осмотра и дополнительное укрепление всех ослабленных участков клеем;
- 8) техническое обслуживание.

После изучения многочисленных материалов и соответствующей литературы, а также проведения многочисленных теоретических исследований и инженерных разработок, основанных на характеристиках армирования листами углеродного волокна, и для обеспечения эффективного армирования в сочетании с методами армирования колонн, подвергаемых осевому сжатию, листами углеродного волокна и испытаниями на статическую нагрузку необходимо учитывать факторы, влияющие на оптимальный метод строительства.

Исследователи в Китае и за рубежом добились значительных результатов посредством экспериментальных исследований и анализа факторов, влияющих на эффективность армирования бетона листами углеродного волокна. Факторы, влияющие на несущую способность железобетонных колонн, подвергающихся осевому сжатию и армированию углеродной тканью, можно суммировать следующим образом:

– Ровность склеиваемой поверхности.

При использовании углеродной ткани для склеивания и армирования бетонных конструкций поверхность бетонного компонента необходимо предварительно отполировать. Для удаления рыхлых и поврежденных участков бетонной поверхности, а также загрязнений от заполнителя и раствора можно использовать механические методы или ручную полировку, чтобы поверхность бетонного компонента была относительно ровной и гладкой. Это способствует плотному сцеплению углеродной ткани с поверхностью бетонного компонента, тем самым улучшая адгезию склеиваемой поверхности.

– Выбор и резка углеродной ткани.

При выборе углеродной ткани перед испытаниями необходимо подтвердить прочность используемых материалов производителем, чтобы убедиться в их соответствии спецификации и уточнить класс прочности. Выбор класса прочности (1 или 2) необходимо учитывать при проектировании испытываемого бетонного компонента.

Резка ткани из углеродного волокна. Во-первых, сформированная ткань из углеродного волокна должна быть разрезана до указанного размера в соответствии с требованиями конструкции. Неровная или косая резка против волокон строго запрещена, чтобы предотвратить падение волокон. Во-вторых, после резки направление склеивания должно соответствовать направлению расположения волокон углеродного волокна. В-третьих, разрезанная лента из углеродного волокна должна быть сухой, чистой и незагрязненной, чтобы избежать прилипания песка, воска, масла и т. д.

– Выбор клея.

При выборе клея следует учитывать, соответствуют ли требованиям микроструктура склеивания и прочность сцепления. На рынке представлено множество типов интерфейсных агентов с различным составом и связующими свойствами. Выбор необходимо осуществлять в соответствии с требованиями руководства по эксплуатации ткани из углеродного волокна.

– Метод склеивания ткани из углеродного волокна.

Исследования и анализ ткани из углеродного волокна в стране и за рубежом показывают, что различные схемы склеивания имеют разную степень повышения несущей способности бетонных компонентов. Этим про-

цессом можно управлять, регулируя размер интервала, ширину расположения и форму окружности расположения кольца ткани из углеродного волокна. На сегодняшний день применяют четыре типа методов склеивания:

- однослойная кольцевая бетонная колонна;
- двухслойная кольцевая бетонная колонна;
- вертикальная и горизонтальная обмотка;
- полная обмотка.

Результаты исследования. Проведены всесторонний и углубленный анализ и исследование механизма армирования и методов возведения железобетонных колонн, подвергающихся осевому сжатию, с использованием листов из углеродного волокна. Как с микроскопической, так и с макроскопической точки зрения механизм армирования показывает, что листы из углеродного волокна, благодаря своей высокой прочности и эластичности, прочно связываются с бетоном. При воздействии на колонны, подвергающиеся осевому сжатию, на эти напряжения влияют сложные и разнообразные факторы. Прочность бетона, степень армирования, а также количество и качество слоев листов из углеродного волокна существенно влияют на эффективность армирования.

Что касается методов строительства, каждый этап от подготовки конструкции до непосредственного склеивания строго регламентирован. Безопасность и меры предосторожности имеют первостепенное значение во время строительства. Рабочие должны использовать средства индивидуальной защиты для предотвращения травм от разлетающихся волокон листов из углеродного волокна. Кроме того, условия строительства должны соответствовать требованиям, включая соответствующую температуру и влажность, для обеспечения надежного сцепления листов из углеродного волокна с бетоном. Углубленный анализ механизма напряжений показывает, что ткань из углеродного волокна, наклеенная на бетонную колонну, подвергающуюся осевому сжатию, будет создавать боковые ограничения. Благодаря эффекту кольца, создаваемому тканью из углеродного волокна, эта пассивная система ограничения может эффективно ограничивать боковую деформацию бетона, тем самым повышая прочность на сжатие железобетонной колонны и повышая общую устойчивость и долговечность конструкции.

Обсуждение и заключение. В области строительства укрепление существующих зданий имеет важное значение для обеспечения их структурной безопасности и функциональности. В настоящее время существует множество методов укрепления, каждый из которых имеет свои особенности.

Метод укрепления с применением приклеивания стальных пластин позволяет быстро провести работы и сократить сроки строительства, но предъявляет высокие требования к качеству работ: от выбора материалов до технологии приклеивания каждый этап должен строго соответствовать нормам, иначе это повлияет на эффективность укрепления и безопасность здания. Метод укрепления путем увеличения сечения имеет низкую стоимость, но занимает пространство внутри здания, изменяет внутреннюю планировку и влияет на функциональность здания. Метод укрепления с применением углеродного волокна применяется широко — материалы обладают высокой прочностью, легкостью и коррозионной стойкостью, способны повысить несущую способность и сейсмостойкость, не добавляя при этом значительного веса. Однако имеет ограничения в анализе узлов и расчете несущей способности, требующие дальнейших исследований. Эффективность укрепления центрально-сжатых железобетонных столбов зависит от многих факторов, таких как свойства материалов, качество работ и т.д.

На практике при выборе метода укрепления необходимо провести комплексную оценку состояния здания и гибко корректировать подход. Для метода укрепления с применением углеродного волокна необходимо углубленно изучить и усовершенствовать теоретические основы проектирования; для укрепления центрально-сжатых столбов требуется разработка новых материалов и технологий, а также усиление контроля качества. Кроме того, необходимо своевременно пересматривать устаревшие стандарты и нормативные акты, чтобы обеспечить научное обоснование работ по укреплению.

Список литературы/ References

1. Сюй Цинфу, Тан Сянтань, Ван Юн. Исследование проектирования и технологии усиления конструкций жилых зданий [J]. *Керамика*. 2025(10):212–214. <https://doi.org/10.19397/j.cnki.ceramics.2025.10.042>
- Xu Qingfu, Tang Xiangtan, Wang Yun Research of Design and Technology of Reinforcement of Structures of Residential Buildings. *Ceramics*. 2025;10:212–214. <https://doi.org/10.19397/j.cnki.ceramics.2025.10.042>
2. Сян Бинцюань, Ли Жуйлинь, Сюй Дань и др. Исследование быстрой проверки сейсмостойкости и методов усиления кирпично-бетонных зданий в районе Чучжоу. *Сычуаньский цемент*. 2025;(11):73–77. <https://doi.org/10.20198/j.cnki.scsn.2025.11.026>

Xiang Bingquan, Li Ruilin, Xu Dan, et. A Study of Rapid Verification of Earthquake Resistance and Reinforcement Methods of Brick-and-Concrete Buildings in the area of Chuzhou. *Sichuan Cement*. 2025;(11):73–77. <https://doi.org/10.20198/j.cnki.scsn.2025.11.026>.

3. Чжао Вэйцзе, Чэн Яньян, Чжан Чжэнь. Исследование методов обследования, оценки и усиления строительных конструкций. *Металлические конструкции в строительстве Китая*. 2025;24(16):79–81. <https://doi.org/10.20080/j.cnki.ISSN1671-3362.2025.16.027>.

Zhao Weijie, Cheng Yangyang, Zhang Zhen Research of Methods of Inspection, Assessment and Reinforcement of Building Structures. *Metal Structures in Chinese Construction*. 2025;24(16):79–81. <https://doi.org/10.20080/j.cnki.ISSN1671-3362.2025.16.027>

4. Ли Гэнмо, Ло Кайхай, Хуан Шиминь и др. Обзор исследований и практического применения методов сейсмического усиления существующих каменных зданий. *Сейсмостойкость и усиление строительных конструкций*, 2025;47(03):139–147. <https://doi.org/10.16226/j.issn.1002-8412.2025.03.016>

Li Genmo, Luo Kaihai, Huang Shimin, et. Review of Research and Practical Application of Seismic Reinforcement Methods for Existing Stone Buildings. *Earthquake Resistance and Reinforcement of Building Structures*. 2025;47(03):139–147. <https://doi.org/10.16226/j.issn.1002-8412.2025.03.016>

5. Чэнь Инкан. Исследование сейсмостойкости и сейсмоизоляционного усиления исторических зданий с кирпично-деревянной конструкцией в районе Линнань. Гуанчжоу: Гуанчжоуский университет, 2025. <https://doi.org/10.27040/d.cnki.ggzdu.2025.000677>

Chen Incan Investigation of Earthquake Resistance and Seismic Insulation Reinforcement of Historical Buildings with Brick and Wooden Structures in Lingnan District. Guangzhou University, 2025. <https://doi.org/10.27040/d.cnki.ggzdu.2025.000677>

6. Юй Хунцзюнь, Чжан Нань. Исследование методов усиления строительных конструкций на основе оптимального проектирования и примеры применения. *Металлические конструкции в строительстве Китая*, 2025;24(06):130–132. <https://doi.org/10.20080/j.cnki.ISSN1671-3362.2025.06.044>

Yu Hongjun, Zhang Nan Research of Reinforcement Methods of Building Structures Based on Optimal Design and Application Examples. *Metal Structures in Chinese Construction*. 2025;24(06):130–132. <https://doi.org/10.20080/j.cnki.ISSN1671-3362.2025.06.044>

7. Гао Син, Ван Вэйюй. Исследование механизма работы и методов усиления жилых построек типа «сюаньяо» (сводчатые пещерные жилища). *Строительные конструкции*. 2025;55(02):143–150. <https://doi.org/10.19701/j.jzjg.20220914>

Gao Xing, Wang Weiyu Investigation of the Mechanism of Operation and Methods of Reinforcement of Residential Buildings of the "Xuanyao" Type (Vaulted Cave Dwellings). *Building Structures*. 2025;55(02):143–150. <https://doi.org/10.19701/j.jzjg.20220914>

8. Ян Шуайминь. Исследование технологий усиления конструкций существующих зданий и их экономической эффективности. Восточно-Китайский технологический университет, 2024. <https://doi.org/10.27145/d.cnki.ghddc.2024.000872>

Yang Shuaimin Research of Technologies for Reinforcing Structures of Existing Buildings and their Economic Efficiency. East China University of Technology, 2024. <https://doi.org/10.27145/d.cnki.ghddc.2024.000872>

9. Лю Лиин, Оу Чжэньфэн, Ян Чуньшань и др. Численное моделирование и анализ натурных измерений деформаций прибрежных конструкций, вызванных разработкой котлована для опускных секций [J]. *Предупреждение и ликвидация аварий в тоннелях и подземных сооружениях*. 2024;6(04):12–19. <https://doi.org/10.19952/j.cnki.2096-5052.2024.04.02>

Liu Liying, Ou Zhenfeng, Yang Chunshan, et. Numerical Modeling and Analysis of Full-Scale Measurements of Deformations of Coastal Structures Caused by the Development of a Foundation Pit for Lowering Sections. *Prevention and Elimination of Accidents in Tunnels and Underground Structures*. 2024;6(04):12–19. <https://doi.org/10.19952/j.cnki.2096-5052.2024.04.02>

10. Ван Яохань. Краткий анализ применения технологий усиления строительных конструкций. В: *Металлические конструкции в строительстве Китая. Сборник трудов Форума по интеллектуальному строительству и экономическому развитию с точки зрения новых качественных производительных сил (I)*. ООО «Уханьский институт проектирования муниципального строительства». 2024:156–157. <https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2024.036623>

Wang Yaohan A Brief Analysis of the Application of Reinforcement Technologies for Building Structures. *Metal Structures in Chinese Construction. Proceedings of the Forum on Intellectual Construction and Economic Development from the Perspective of New Qualitative Productive Forces (I)*. Wuhan Institute of Municipal Construction Design, LLC. 2024:156–157. <https://www.chndoi.org/Resolution/Handler?doi=10.26914/c.cnkihy.2024.036623>

Об авторе:

Чэ Сянюй, аспирант Шаньдунского транспортного университета (Китайская народная республика, провинция Шаньдун г. Цзинань), [ORCID](#), Chexiangyu003@163.com

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Che Xianyu, PhD student at Shandong Jiaotong University (Jinan, Shandong Province, People's Republic of China), [ORCID](#), Chexiangyu003@163.com

Conflict of interest statement: the author does not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 01.10.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 14.10.2025

Принята к публикации / Accepted 28.10.2025