

К вопросу использования углепластика для усиления центрально-сжатых железобетонных колонн

Чэ Сянюй, Д.Р. Маилян

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: При осевых испытаниях железобетонные колонны, усиленные углепластиком, демонстрируют значительное улучшение характеристик за счёт поперечного ограничения деформаций: кольцевая обмотка углеволокном создаёт трёхосное сжатие, существенно повышая предельную прочность бетона на сжатие и несущую способность при осевой нагрузке. Эффективность усиления цилиндрических колонн возрастает с увеличением количества слоёв, тогда как квадратные требуют скругления углов для оптимизации ограничения. Углепластик замедляет хрупкое разрушение бетона, делает процесс разрушения более плавным, значительно повышает остаточную деформацию и несущую способность. Материал эффективно снижает распространение микротрещин, сокращает их количество и ширину, улучшая долговечность. При циклическом нагружении усиливается энергоёмкость и скорость деградации несущей способности, предотвращается отслоение защитного слоя, повышается сейсмостойкость. Технология отличается простотой монтажа, малым весом, стойкостью к коррозии и старению, низкими эксплуатационными затратами.

Эксперименты выявили зависимость эффекта усиления от количества слоёв и шага обмотки: квадратные колонны требуют скругления углов, наблюдается снижение характеристик при высоких температурах и концентрация напряжений в углах, способная вызвать локальное разрушение. Рекомендуются преимущественное применение этих методов для колонн с недостаточной несущей способностью при осевом сжатии, низкой пластичностью или повышенными сейсмическими требованиями, особенно в агрессивных средах. Цилиндрические колонны предпочтительнее квадратных. Радиус скругления ≥ 20 мм, 2-3 слоя углепластика обеспечивают значительное улучшение характеристик.

Ключевые слова: углепластик, усиление железобетонных колонн, несущая способность при осевом сжатии.

Введение

В области строительства железобетонные колонны, как ключевые несущие элементы, напрямую влияют на безопасность и устойчивость каркасов зданий и сооружений. Со временем, под воздействием эксплуатационных нагрузок, а нередко и агрессивной среды, многие существующие колонны подвергаются повреждениям и деградации, к которым относятся развитие трещин, снижение прочности и несущей способности. Это создает серьёзную угрозу целостности сооружений [1,2].

Традиционные методы усиления (увеличение сечения, обоймы из стального проката) хотя и повышают несущую способность, обладают существенными недостатками: сложность монтажа, длительные сроки, увеличение массы конструкции, повреждение исходной структуры. Например, для увеличения сечения требуется установки опалубки, арматуры и бетонирования, а обеспечение сцепления нового бетона с существующим проблематично. Метод стальной обоймы предполагает установку и сварку стальных элементов, что технологически сложно и требует дополнительной антикоррозионной защиты.

В этом контексте углепластик как современный высокоэффективный композитный материал демонстрирует значительные возможности в области усиления конструкций благодаря высокой прочности, жёсткости, малому весу, коррозионной стойкости и простоте монтажа. Технология усиления железобетонных колонн углепластиком заключается в наклеивке углеволокнистых тканей или листов на поверхность колонн с помощью структурного клея, что обеспечивает совместную работу материала с бетоном и повышение несущей способности, пластичности и сейсмостойкости колонн [3,4].

Для глубокого изучения эффективности и механизмов усиления углепластиком были выбраны сжатые железобетонные конструкции зданий и сооружений. Испытания моделируют реальные условия нагружения, позволяя точно измерять ключевые механические параметры (несущую способность, деформационные характеристики, формы разрушения) до и после усиления. Полученные данные служат научной основой для проектирования и реализации проектов усиления углепластиком,

способствуя дальнейшему развитию применения композитных материалов в области укрепления конструкций. Таким образом, исследование работы усиленных углепластиком железобетонных колонн при осевом сжатии имеет важное теоретическое и практическое значение [5,6].

Объекты исследования:

1. Цели испытания бетонных колонн, усиленных углепластиком, на осевое сжатие:

– Значение для усиления и восстановления строительных конструкций

В железобетонных конструкциях проведение испытаний колонн на центральное сжатие с целью проверки их предельной несущей способности и характера разрушения имеет важное значение для усиления и восстановления строительных конструкций. Это позволяет оценить безопасность существующих конструкций, определить пределы несущей способности и выявить потенциальные риски, обосновать необходимость усиления, выбор методов и оптимизацию параметров проектирования, проверить эффективность усиления, оценив повышение несущей способности и целостности конструкции после укрепления, накопить экспериментальные данные и опыт для совершенствования нормативов, внедрения новых технологий и материалов, а также развития методов восстановления.

– Практическое значение

При реконструкции старых зданий оценивают несущие свойства колонн для разработки схем усиления, что особенно актуально для реставрации исторических объектов, последствия чрезвычайных происшествий: экспресс-оценка остаточной прочности повреждённых колонн для разработки ремонтных решений; проектирование новых конструкций: моделирование

работы колонн с различными параметрами обеспечивает данные для прогнозирования поведения и оптимизации проектов; исследование поведения колонн в новых типах конструкций и методов применения углепластика, создавая техническую базу для внедрения инноваций [7,8].

2. Характеристики материала углепластик

Углепластик состоит из непрерывных углеродных волокон (диаметр 5–20 мкм) и полимерной матрицы (смола с отвердителем). Пропитка волокон смолой с последующим отверждением формирует материал со следующими свойствами: плотность составляет $\approx 1/6$ от плотности стали, что минимизирует дополнительную нагрузку на конструкции; предел прочности при растяжении в 4–6 раз выше, чем у арматурной стали; коррозионная стойкость к кислотам и щелочам, продлевающая срок службы конструкций; немагнитные свойства, не влияющие на распространение электромагнитных сигналов; высокая усталостная прочность, превосходящая показатели стали; коэффициент температурного расширения, близкий к бетону, и модуль упругости, сопоставимый со сталью; предельное относительное удлинение: 1%. Комплекс этих характеристик делает углепластик идеальным материалом для усиления железобетонных конструкций [9].

3. Механические принципы испытания железобетонных колонн, усиленных углепластиком, на осевое центральное сжатие.

– Эффект поперечного ограничения

При осевом сжатии железобетонная колонна испытывает поперечное расширение. Оборачивание колонны углепластиком создаёт поперечное ограничение, препятствующее этому расширению. Данный эффект переводит бетон в состояние трёхосного напряжённого состояния, что существенно

повышает его предельную деформацию сжатия и несущую способность по сравнению с одноосным нагружением. При отсутствии значительного снижения прочности на изгиб и исключении влияния потери устойчивости, усиленная колонна демонстрирует повышенную пластическую деформацию и энергоёмкость.

– Контактные ограничивающие напряжения

Между углепластиком и бетонной колонной возникают силы взаимодействия, называемые контактными ограничивающими напряжениями [10]. Под воздействием поперечных контактных напряжений ядро бетона в пластической зоне переходит в трёхосное напряжённое состояние, улучшая его механические характеристики. Углепластик генерирует ограничивающие напряжения только при поперечном расширении бетона (пластической деформации), поэтому процесс нагружения колонны, усиленной кольцевой обмоткой углепластики, проявляется в две стадии:

Первая стадия: При малых осевых напряжениях в бетоне поперечные деформации незначительны, нагрузка на углепластик минимальна.

Вторая стадия: С ростом нагрузки деформации бетона усиливаются, вызывая резкое увеличение кольцевых напряжений в углепластик и ограничивающих усилий до момента разрыва материала при достижении им предельной деформации растяжения [11,12].

4. Экспериментальные исследования железобетонных колонн, усиленных углепластиком, при осевом центральном сжатии

– Проектирование эксперимента

Для изучения влияния усиления углепластиком на механические свойства бетонных колонн была разработана серия экспериментов с различными параметрами. Изготавливались образцы колонн длиной 120 см с разными формами поперечного сечения (эллиптические цилиндры и прямоугольные сечения) и количеством слоёв углепластика (0, 2 и 3 слоя). (рис. 1) Класс бетона по прочности принимался В30. Использовалась однонаправленная углеволокнистая ткань с характеристиками, включающими толщину, массу на единицу площади, предел прочности при растяжении, модуль упругости и предельное удлинение. На геометрических центрах четырёх боковых поверхностей образцов устанавливались тензодатчики для измерения поперечных и продольных деформаций в средней части колонн при осевом сжатии, а средняя вертикальная деформация сжатия фиксировалась с помощью датчиков перемещения (рис. 2).

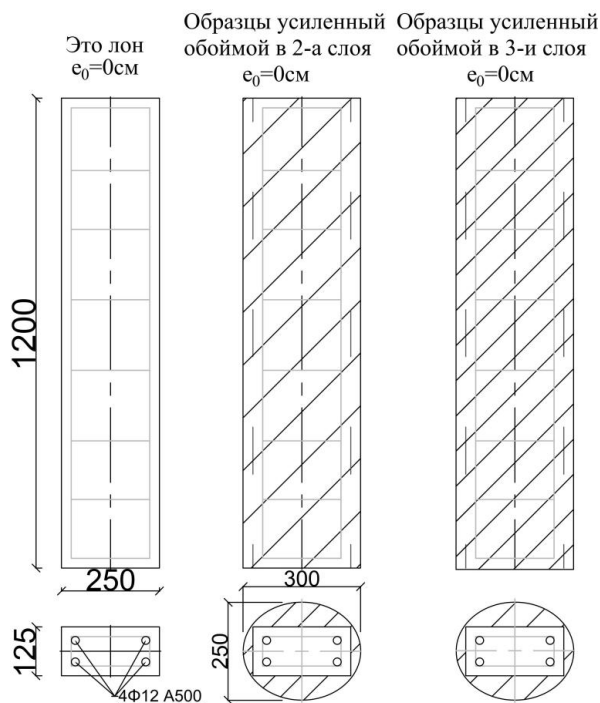


Рис. 1. – Схема экспериментальных образцов для программы исследований



Рис. 2. – Фотография реальных испытаний экспериментальных образцов

Анализ результатов эксперимента

Несущая способность

Результаты испытаний демонстрируют значительное повышение предельной несущей способности бетонных колонн при использовании углепластика.

Например, для цилиндрических образцов:

Предельная нагрузка неармированной колонны составила 1340 кН.

После наклейки 2 слоёв углепластика показатель возрос до 2707 кН.

С 3 слоями углепластика зафиксировано дальнейшее увеличение до 2998 кН.

При трёх слоях армирования эффект усиления более выражен, чем при двух слоях, однако рост показателей не пропорционален площади усиления.

Деформационная способность

Армирование углепластиком также снижает риск вертикальных перемещений, поперечных и продольных деформаций колонн. При осевом

центральном сжатии усиленные образцы под одинаковой нагрузкой демонстрируют: заметно меньшие вертикальные перемещения, а также сниженные поперечные и продольные деформации.

Данные наблюдения подтверждают увеличение жёсткости конструкций и повышение устойчивости и безопасности при сохранении меньших деформаций в процессе нагружения.

Характер разрушения

Неармированные бетонные колонны при осевом сжатии разрушаются хрупко, с мгновенным распространением трещин и разрушением бетона. Армирование углепластиком принципиально меняет характер разрушения.

На начальной стадии нагружения трещины отсутствуют. При росте нагрузки появляются микротрещины с медленным развитием. В зоне предельных нагрузок активируется ограничивающая функция углепластика, сдерживающая развитие трещин. Разрушение наступает после достижения углепластиком предельной деформации растяжения (рис. 3).

Данный прогрессирующий характер разрушения относится к пластическому типу, обеспечивающему временной резерв для эвакуации людей и выполнения ремонтных работ.



Рис. 3. –Сравнительная схема зон окончательного разрушения трёх экспериментальных образцов

5. Анализ этапов эксперимента

Подготовительные работы до эксперимента

- Разработка ключевых параметров (размеры, армирование) бетонных колонн в соответствии с целями эксперимента для точного отражения реальных инженерных требований.
- Изготовление образцов колонн со строгим контролем прочности бетона и параметров армирования в соответствии с проектными требованиями.
- Создание преднамеренных трещин или повреждений на образцах для моделирования реальных условий усиления и последующего наблюдения за эффективностью.

Подготовка высококачественных материалов: углеволокнистой ткани, углепластика и структурного клея, соответствующих стандартным требованиям.

- Комплектация измерительными приборами (тензодатчики, датчики перемещений) и нагрузочным оборудованием (гидравлическая испытательная машина) для обеспечения бесперебойного эксперимента.

Поверхностная обработка образцов

- Тщательная шлифовка поверхности колонн для удаления цементного молока, масляных загрязнений и обеспечения ровной чистой основы.
- Снятие фасок на углах колонн для предотвращения концентрации напряжений.
- Удаление пыли сжатым воздухом и обезжиривание поверхности ацетоном/спиртом.

- Нанесение грунтового состава: смешивание основного компонента с отвердителем в заданной пропорции с медленным перемешиванием.
- Равномерное нанесение грунтовки валиком/кистью с контролем толщины слоя и устранением пузырьков воздуха с последующей шлифовкой после отверждения.

Усиление эллиптических бетонных колонн

- Монтаж металлической сетки по периметру квадратной колонны с заполнением зазоров бетонной смесью для повышения прочности.
- Нанесение дополнительного слоя бетона после заполнения для увеличения несущей способности.

Наклейка ткани углепластика

- Раскрой ткани по размерам колонны с обеспечением ровных кромок.
- Приготовление клеящей смеси в требуемой пропорции с достижением оптимальной вязкости.
- Нанесение клея на поверхность колонны с последующей укладкой ткани и устранением пузырей воздуха прокатным валиком. При многослойном усилении повторение процедуры с контролем качества каждого слоя.
- Нанесение защитного слоя клея с последующей шлифовкой после отверждения.

Уход и защита

– Обертывание бетонных колонн полиэтиленовой пленкой с усиленной защитой торцов для поддержания влажности и предотвращения трещин.

Исключение воздушных полостей при наклейке углепластика для обеспечения равномерного распределения нагрузок.

Проведение эксперимента и наблюдения

– Установка металлических оголовков с цементной прослойкой на торцах колонн перед испытаниями. Для эллиптических колонн - дополнительная стальная плита под низом.

– Центрирование образца в гидравлической машине для обеспечения осевого нагружения.

– Монтаж тензодатчиков и датчиков перемещения на фиксированных точках.

– Постепенное нагружение с выдержкой каждой ступени нагрузки ~10 минут и фиксацией деформаций.

– Детальная регистрация данных о перемещениях, напряжениях и нагрузках с построением таблиц и кривых "нагрузка-перемещение".

– Построение графиков и диаграмм для анализа механических характеристик и характера разрушения усиленных колонн.

Выводы и рекомендации

В ходе экспериментальных исследований по использованию углепластикового материала для усиления железобетонных колонн углепластик продемонстрировал незаменимую и жизненно важную роль. Его

собственные превосходные свойства обеспечивают прочную основу для улучшения эксплуатационных характеристик бетонных колонн. Углепластик эффективно ограничивает поперечное расширение и деформацию бетона при сжатии, применяя боковые ограничения к бетонной колонне. Этот вид бокового ограничения подобен надеванию прочного “обруча” на бетонную колонну, так что бетон находится в состоянии трехстороннего сжатия, тем самым значительно повышая прочность бетона на сжатие. В то же время, напряжение, возникающее между углепластиком и бетоном, еще больше повышает их способность за счет совместной работы обеспечивать возможность распределения нагрузки в процессе приложения усилия и предотвращает преждевременные повреждения, вызванные локальной концентрацией напряжений.

Результаты экспериментов наглядно и убедительно доказывают значительный эффект армирования углепластиком. Что касается несущей способности, то максимальная несущая способность бетонной колонны, армированной углепластиком, была значительно повышена. По сравнению с не усиленными колоннами, армированные композитами колонны могут выдерживать большее осевое давление. Это часто означает, что размеры конструктивных элементов могут быть уменьшены или нагрузка на конструкцию может быть увеличена, что обеспечивает большие возможности архитектурного проектирования. Что касается деформационных характеристик, армирование углепластиком эффективно уменьшает вертикальное смещение бетонной колонны. Под действием той же нагрузки усиленная колонна имеет меньшую вертикальную деформацию, что означает, что конструкция может лучше сохранять свою геометрическую форму и иметь меньшие прогибы во время эксплуатации, снижая риски для безопасности, вызванные чрезмерной деформацией. Углепластиковая арматура также значительно повышает пластичность бетонной колонны.

Пластичность является важным показателем для измерения способности конструкции поглощать энергию и подвергаться пластической деформации перед разрушением. Армирование углепластиком изменяет характер поведения в практической стадии с первоначального хрупкого на пластичное. В процессе разрушения усиленные конструкции могут вызвать большую пластическую деформацию и явные признаки разрушения, что позволяет сэкономить время для эвакуации персонала и аварийного ремонта конструкции, а также значительно повысить безопасность сооружения.

В реальных инженерных приложениях важно обеспечить эффект армирования, разумно подобрав схему армирования углепластиком и действуя в строгом соответствии с основными конструктивными моментами. Различные инженерные конструкции имеют разные силовые характеристики, условия эксплуатации и требования к дизайну. Поэтому, в соответствии с конкретными условиями работы, необходимо учитывать размер бетонной колонны, положение арматуры, условия окружающей среды, расчетную нагрузку и другие факторы, а также тщательно продумывать армирующий слой из углепластика, способ приклеивания, меры по усилению и другие параметры. В то же время в процессе строительства необходимо строго контролировать каждый аспект - от обработки поверхности бетонной колонны, резки и наклеивания углепластикового полотна до технического обслуживания и защиты. Эти меры нужны, чтобы обеспечить хорошее сцепление между углепластиком и бетоном и в полной степени использовать армирующую роль углепластика.

С непрерывным развитием строительных технологий и постоянным повышением требований к безопасности и долговечности строительных конструкций, перспективы применения углепластика в области армирования бетонных конструкций становятся все более широкими. Он подходит не только для армирования вновь возводимых сооружений, имеющих

недостаточную прочность из-за конструктивных изменений или строительных ошибок, но и играет важную роль при усилении существующих строительных конструкций, особенно для некоторых старых зданий, представляющих историческую и культурную ценность. Армирование углепластиком позволяет эффективно улучшить его конструктивные характеристики и продлить срок службы без разрушения первоначального архитектурного стиля. Однако в настоящее время в технологии армирования углепластиком все еще существуют проблемы, требующие дальнейшего изучения и решения, таких, как долговечность сцепления на поверхности раздела между углепластиком и бетоном при длительных нагрузках, эрозия окружающей среды, а также механические свойства конструкций, армированных углепластиком, при сложных нагрузках. Необходимо продолжить углубленное изучение технологии армирования углепластиком, постоянно оптимизировать конструкцию армирования, улучшать эффект армирования и способствовать развитию технологии армирования углепластиком посредством сочетания теоретических инноваций, экспериментальных исследований и инженерной практики, чтобы обеспечить более надежную и действенную гарантию безопасности и устойчивого развития строительных проектов.

Литература

1. Лю Мутянь. Исследование методов проектирования и усиления бетонных конструкций углепластиком // Адгезивы. Т. 41. № 3. С. 73-77.
2. Лю Динтун. Оценка эффективности усиления бетонных элементов углепластиком // Научно-технические инновации. 2025. № 22. С. 131-134.
3. Фу Яцинъ. Введение к специальной рубрике "Структура и свойства углепластика" // Современные текстильные технологии. 2025. Т. 33. № 11. С. 91.

- 4 Ван Фэй. Проектирование усиления и анализ характеристик существующего здания // Кирпич и черепица. 2025. № 11. С. 58-60+64. DOI: 10.16001/j.cnki.1001-6945.11.015.
 5. Цзян Жэнь, Пэн Чуфань, Чэнь Цитао. Оценка устойчивости к прогрессирующему обрушению усиленных CFRP бетонных подконструкций при взрывном нагружении // Журнал Восточно-Китайского университета транспорта. 2025. С. 1-11. DOI: 10.16749/j.cnki.jesjtu.008.06,11
 6. Чжай Сяньмэй. Применение строительных технологий в реконструкции старых зданий // Теоретические исследования градостроительства. 2025. № 31. С. 61-63. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.
 7. Се Хуа, Ван Тао. Анализ применения проектирования усиления железобетонных конструкций в строительстве // Цемент. 2025. № 11. С. 149-151. DOI: 10.13739/j.cnki.cn11-1899/tq.
 8. Ма Дин. Анализ применения углепластика в проектах усиления конструкций // Теоретические исследования градостроительства. 2025. № 29. С. 181-183. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.
 9. Хоу Хуаньхуань. Технология усиления бетонных конструкций углепластиком // Высокие технологии Китая. 2025. № 14. С. 128-130. DOI: 10.13535/j.cnki.10-1507/n.2025.14.41.
 10. Мин Синьчжэ, Ли Хуагуан. Достижения в исследованиях механических свойств интерфейса сцепления углепластиковых композитов с бетоном // Стекловолокно. 2024. № 6. С. 50-56. DOI: 10.13354/j.cnki.cn32-1129/tq.2024.06.009.
 11. Цянь Жолин, Хуан Чуньхуэй. Исследование применения углепластика в укреплении строительных конструкций // Старение и применение синтетических материалов. 2023. Т. 52. № 6. С. 117-119. DOI: 10.16584/j.cnki.issn1671-5381.2023.06.030.
-

12. Ван Хэнцзя, Пань Цзюнь, Пэн Хуэй и др. Полуаналитическое решение для упругих характеристик бетонных конструкций с поверхностно-встроенным CFRP // Журнал Чаншаского университета науки и технологий (естественные науки). 2025. Т. 22. № 1. С. 91-100. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230504001.

References

1. Lyu Mutyan`. Adgezivy`. Т. 41. № 3. pp. 73 - 77.
2. Lyu Dintun. Nauchno-texnicheskie innovacii. 2025. № 22. pp. 131-134.
3. Fu Yacin`. Sovremenny`e tekstil`ny`e texnologii. 2025. Т. 33. № 11. p. 91.
4. Van Fe`j. Kirpich i cherepicza. 2025. № 11. pp. 58-60. DOI: 10.16001.j.cnki.1001 6945.11.015.
5. Czzyan Zhe`n`, Pe`n Chufan`, Che`n` Citao. Zhurnal Vostochno-Kitajskogo universiteta transporta. 2025. pp. 1-11. DOI. 10.16749/j.cnki.jecjtu.008.06,11
6. Chzhaj Syan`me`j. Teoreticheskie issledovaniya gradostroitel`stva. 2025. № 31. pp. 61-63. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.
7. Van Tao. Cement. 2025. № 11. pp. 149 - 151. DOI 10.13739 j.cnki.cn11 1899 tq.2025.11.046.
8. Ma Din. Teoreticheskie issledovaniya gradostroitel`stva. 2025. № 29. pp. 181-183. DOI 10.19569 j.cnki.cn119313 tu.
9. Xou Xuan`xuan`. Vy`sokie texnologii Kitaya. 2025. № 14. pp. 128-130. DOI 10.13535 j.cnki.10 1507 n.2025.14.41.
10. Min Sin`chzhe`, Li Xuaguan. Steklovolokno. 2024. № 6. pp. 50 - 56. DOI 10.13354 j.cnki.cn32 1129 tq.2024.06.009.



11. Czuan` Zholin, Xuan Chun`xue`j. Starenie i primenenie sinteticheskix materialov. 2023. T. 52. № 6. pp. 117-119. DOI 10.16584 j.cnki.issn16715381.2023.06.030.
12. Van Xe`nczzya, Pan` Czzyun`, Pe`n Xue`j i dr. Zhurnal Chanshaskogo universiteta nauki i tehnologij estestvenny`e nauki. 2025. T. 22. № 1. pp. 91-100. DOI: 10.19951 j.cnki.1672 9331.20230504001.

Дата поступления: 6.11.2025

Дата публикации: 8.12.2025