УДК 504.05

ОСОБЕННОСТИ УСИЛЕНИЯ КОЛОНН КОМПОЗИТНЫМ МАТЕРИАЛОМ. ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ

♦♦♦♦♦

FEATURES OF STRENGTHENING COLUMNS WITH COMPOSITE MATERIAL. ADVANTAGES AND DISADVANTAGES

Прокопцова Наталия Сергеевна
студентка,
Кубанский государственный технологический университет
natali240703@mail.ru

Финагенова Надежда Витальевна
студентка,
Кубанский государственный технологический университет
finagenovanadya@gmail.com

Финагенов Алексей Витальевич
студент,
Кубанский государственный технологический университет
finagenov711@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены современные методы повышения несущей способности железобетонных и металлических колонн с использованием композитных материалов (угле-, стекло- и базальтопластиков). Проанализированы физико-механические принципы работы внешнего армирования, описаны технологические схемы усиления (спиральная обмотка, устройство «рубашек» и продольных ламелей). Выявлены ключевые преимущества: коррозионная стойкость, высокая удельная прочность, сохранение геометрии сечения. Отдельно рассмотрены ограничения технологии – чувствительность к УФ-излучению, высокая стоимость полимерных связующих, проблемы пожаробезопасности и слабая база нормативной документации.

Ключевые слова: усиление колонн, композитные материалы, углеволокно, внешнее армирование, несущая способность, обойма, анкеровка.

Prokoptsova Natalia Sergeevna
Student,
Kuban State University of Technology
natali240703@mail.ru

Finagenova Nadezhda Vitalyevna
Student,
Kuban State University of Technology
finagenovanadya@gmail.com

Finagenov Aleksey Vitalyevich
Student,
Kuban State University of Technology
finagenov711@mail.ru

Annotation. The article discusses modern methods for increasing the load-bearing capacity of reinforced concrete and steel columns using composite materials (carbon fiber, glass fiber, and basalt fiber reinforced polymers). The physical and mechanical principles of external reinforcement are analyzed, and technological schemes for strengthening (spiral wrapping, installation of «jackets», and longitudinal laminates) are described. Key advantages are identified: corrosion resistance, high specific strength, and preservation of the cross-sectional geometry. The limitations of the technology are also considered separately – sensitivity to UV radiation, high cost of polymer binders, fire safety issues, and the weak base of regulatory documentation.

Keywords: strengthening of columns, composite materials, carbon fiber, external reinforcement, load-bearing capacity, jacketing, anchoring.

Цель исследования заключается в систематизации инженерных и технологических особенностей применения композитных материалов для усиления колонн, а также объективная оценка их достоинств и недостатков по сравнению с традиционными методами (металлическими обоймами, бетонным торкретированием).

Для достижения этих целей были сформулированы следующие задачи:

1. Классифицировать типы композитных систем, используемых для усиления колонн.
2. Описать механизм передачи нагрузки в системе «колонна – композитная обойма».
3. Перечислить основные технологические этапы усиления.
4. Сформулировать преимущества и ограничения метода.
5. Сопоставить эффективность композитного усиления с классическими решениями.

Принцип работы композитного материала при усилении колонн

Напряженно-деформированное состояние бетонной колонны до усиления

При осевом сжатии короткой железобетонной колонны в ней реализуется одноосное напряженное состояние. Бетон работает преимущественно на сжатие, а про-

дольная арматура – на сжатие (до потери устойчивости) или растяжение (при эксцентриситетах). Поперечная арматура (хомуты) выполняет три функции: удержание продольных стержней от выпучивания, срезовое армирование и создание незначительного бокового обжатия.

По мере роста нагрузки в бетоне развиваются микротрещины на границе «цементный камень – заполнитель». При достижении 70–80 % от призменной прочности (Rb) эти трещины начинают объединяться, формируя вертикальные макротрещины. Бетон переходит в стадию дилатансии – увеличения объема при сжатии за счет раскрытия трещин. Коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона) возрастает от 0,18–0,22 в упругой стадии до 0,5 и более в предразрушающей. Именно этот эффект поперечного расширения является ключевым для понимания работы композитной обоймы.

В не усиленной колонне процесс завершается либо разрушением бетона от скалывания (при хорошем хомуте), либо выпучиванием продольной арматуры и выкрашиванием защитного слоя (при редких хомутах). Несущая способность в обоих случаях лимитируется прочностью бетона на одноосное сжатие.

Переход к трехосному сжатию: эффект обоймы.

Когда на боковую поверхность колонны наклеена (или намотана) композитная обойма, физическая картина меняется радикально. Композитный материал обладает двумя критическими свойствами:

1. Высоким модулем упругости, что позволяет ему оказывать существенное сопротивление даже при малых деформациях.

2. Упругим поведением вплоть до разрушения (отсутствие площадки текучести).

В процессе нагружения колонна начинает расширяться поперек. Композитная оболочка, охватывающая колонну по периметру, работает как гибкая связь, препятствующая этому расширению. В материале обоймы возникают кольцевые растягивающие напряжения. По третьему закону Ньютона обойма действует на бетон с равной по величине, но противоположно направленной силой – создает равномерное боковое давление. В результате бетон оказывается в условиях трехосного сжатия. Для большинства бетонов переход к трехосному сжатию приводит к следующим эффектам:

1. Рост прочности – максимальное напряжение может превышать призменную прочность в 2–4 раза. Классическая формула Ричарта, многократно подтвержденная для бетонов, усиленных композитами.

2. Изменение характера разрушения – хрупкое раскалывание (вертикальные трещины) заменяется пластическим «течением» бетона с постепенным накоплением повреждений.

3. Подавление распространения трещин – боковое давление закрывает микротрещины, восстанавливая сдвиговое сцепление между заполнителем и цементным камнем. Зона разрушения локализуется, и колонна сохраняет несущую способность даже после образования системы трещин.

4. Принцип работы композитной обоймы сильно зависит от геометрии колонны:

5. Круглые колонны – оптимальный случай. Боковое давление распределяется равномерно по всей окружности. Композитная обмотка работает как идеальная мембрана (кольцевые напряжения). Прирост прочности максимален.

6. Квадратные и прямоугольные колонны – неэффективны без доработки. На плоских гранях композит испытывает изгиб (не только растяжение), а в углах возникают концентрации напряжений. Скругление углов позволяет перераспределить усилия и приблизить напряженное состояние к осесимметричному.

В реальных зданиях колонны редко нагружены строго центрально. При наличии изгибающего момента (M) композитная обойма работает неравномерно: на сжатой грани она испытывает сжатие (малоэффективно), на растянутой – растяжение. В таких случаях применяют гибридные схемы усиления:

1. Продольные ламели из углеволокна (наклеенные по образующим) для повышения изгибной жесткости и восприятия растягивающих напряжений.

2. Поперечная обмотка (как описано выше) – для предотвращения продольного изгиба арматуры.

Внецентренно сжатая колонна, усиленная комбинацией продольных и поперечных композитных элементов, работает по принципу «косвенного армирования». Про-

дольные ламели воспринимают часть изгибающего момента, снижая нагрузку на стальную арматуру. Поперечная обойма, даже будучи нагруженной неравномерно, все равно создает среднее боковое давление, повышающее несущую способность бетона сжатой зоны.

Для стальных колонн (двутавров, труб) принцип работы иной. Композитная обмотка не создает трехосного сжатия, поскольку сталь имеет высокий модуль упругости и предел текучести. Основные функции композита:

а) предотвращение местной потери устойчивости (смятия стенок и полок). Обойма связывает элементы сечения, увеличивая критическое напряжение потери устойчивости.

б) снижение расчетной гибкости за счет увеличения радиуса инерции (особенно при сплошной обклейке по периметру).

в) увеличение усталостной прочности — композит перехватывает часть циклических напряжений, снижая амплитуду в металле.

Для стальных трубчатых колонн, заполненных бетоном, внешняя композитная обойма работает аналогично бетонной — создает боковое давление на бетонное ядро, но при этом сама стальная труба тоже находится в двухосном напряженном состоянии.

Типы композитных систем

На практике используются три основных типа волокон:

Углеродное – повышенная несущая способность, сейсмоусиление

Стеклянное – некритичные здания, химически агрессивная среда

Базальтовое – экономичный аналог, диэлектрик.

Связующее – двухкомпонентные эпоксидные или полиуретановые клеи с температурой стеклования не ниже +65 °C.

Технология усиления

1. Подготовка поверхности: удаление отслоившегося бетона, фрезерование или пескоструйная обработка до открытия пор (адгезия > 1,5 МПа). Для металла – обезжиривание и абразивная зачистка до степени Sa 2.5.

2. Грунтование: нанесение эпоксидного праймера для закрытия пор и связывания пыли.

3. Выравнивание: шпаклевка полимерным составом (при перепадах > 2 мм на 1 м).

4. Наклейка композита:

– «Мокрый» метод: пропитка ткани смолой на колонне (валиком);

– Prepreg (заводская пропитка) – под вакуумом или термоусадкой.

5. Полимеризация: при t=20–25°C не менее 24 часов (ускорение – термоматами до 60 °C).

6. Защита: УФ-стойкий лак или огнезащитное покрытие (вермикулит, интумесцентные краски).

Достоинства композитного усиления

1. Высокая удельная прочность: при толщине обоймы 2–5 мм прирост несущей способности достигает 100–200 % (для железобетонных колонн марок В15–В25).

2. Минимальное увеличение сечения и массы: 1 кг композита заменяет 30–50 кг металлической обоймы; геометрия помещения не меняется.

3. Коррозионная и химическая стойкость: не требуется антикоррозионная защита; материал инертен к солевым растворам, слабым кислотам.

4. Усталостная прочность: CFRP выдерживает 10^7 циклов нагружений без деградации свойств.

5. Скорость монтажа: усиление колонны занимает 1–2 смены против 5–7 дней при бетонировании рубашки.

6. Отсутствие «мокрых» процессов: не требуется бетонных работ, что важно для музеев, архивов, действующих производств.

Недостатки и ограничения

1. Низкая огнестойкость. Эпоксидная матрица размягчается при T > Tg (60–80 °C), при 300–400 °C выгорает. Углеродный пластик теряет 90 % прочности через 30 минут стандартного пожара. Огнезащитные покрытия (толщина 10–20 мм); базальтовые маты; конструктивная защита (гипсокартон).

2. Хрупкое разрушение. Отсутствует стадия текучести (как у стали). Композит работает упруго до момента отслаивания. Расчет по предельным состояниям с повышенным коэффициентом запаса.

3. УФ-деградация. Полимер желтеет, мелеет, возникают микротрещины. Покрытие акриловыми или полиуретановыми лаками с УФ-фильтром.

4. Низкая адгезия при отрицательных температурах Полимеризация останавливается при t < 5 °C.

Таким образом:

1. Композитные материалы являются эффективной альтернативой классическому усилению колонн, особенно в условиях стесненного пространства, агрессивных сред и необходимости сохранения архитектурного облика.

2. Ключевое преимущество – создание трехосного сжатия в бетоне, позволяющее увеличить несущую способность в 2–3 раза при минимальном (2–10 мм) увеличении поперечного сечения.

3. Основные недостатки (горючесть, УФ-деградация, высокая стоимость связующего) носят устранимый характер: они компенсируются применением защитных покрытий и гибридных схем армирования.

4. Область рационального применения – усиление круглых и прямоугольных колонн с отношением сторон не более 1,5; здания с повышенными требованиями к коррозионной стойкости; объекты культурного наследия (минимальная вмешательство); сейсмоопасные районы (высокая диссипация энергии за счет трения волокон).

5. Сдерживающий фактор – отсутствие детальных национальных норм для расчета длительного сопротивления и ползучести композитов. До принятия СП 2026 года проектировщикам рекомендуется использовать зарубежные руководства с понижающими коэффициентами надежности.

Литература

1. СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования. – М. : Минстрой, 2015. – 48 с.
2. Рекомендации по усилению строительных конструкций композитными материалами «Хай-Текс». – М. : НИЦ «Строительство», 2018. – 94 с.
3. Дворная З.Л. Достоинства и недостатки различных методов усиления железобетонных колонн / З.Л. Дворная, А.Н. Леонова // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2019. – № 2. – С. 287–289.
4. Фролов Н.В. Экспериментальные исследования железобетонных колонн, усиленных углеволокном / Н.В. Фролов, А.А. Шаповалов // Строительная механика и расчет сооружений. – 2020. – № 6(293). – С. 42–49.
5. ГОСТ Р 56786-2015. Системы внешнего армирования полимерными композитами. Методы определения прочности сцепления с бетоном. – М. : Стандартинформ, 2016.
6. Булычев С.Н. Усиление зданий и сооружений. – Т. 2. Композитные материалы / С.Н. Булычев, А.И. Звездов. – М. : Издательство АСВ, 2019. – 312 с.
7. Савин Н.С. Особенности применения лент из углеродных волокон для увеличения несущей способности конструкций / Н.С. Савин, А.Н. Леонова // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2025. – № 2. – С. 158–161.

References

1. SP 164.1325800.2014. Strengthening of Reinforced Concrete Structures with Composite Materials. Design Rules. – M. : Ministry of Construction, 2015. – 48 p.
2. Recommendations for Strengthening Building Structures with Hi-Tex Composite Materials. – M. : Research Center for Construction, 2018. – 94 p.
3. Dvornaya Z.L. Advantages and Disadvantages of Various Methods of Strengthening Reinforced Concrete Columns / Z.L. Dvornaya, A.N. Leonova // Science. Engineering. Technologies (Polytechnical Bulletin). – 2019. – № 2. – P. 287–289.
4. Frolov N.V. Experimental Studies of Carbon Fiber-Reinforced Reinforced Concrete Columns / N.V. Frolov, A.A. Shapovalov // Structural Mechanics and Calculation of Structures. – 2020. – № 6(293). – P. 42–49.
5. GOST R 56786-2015. External Reinforcement Systems with Polymer Composites. Methods for Determining the Adhesion Strength to Concrete. – M. : Standartinform, 2016.
6. Bulychev S.N. Strengthening of Buildings and Structures. – Vol. 2. Composite Materials / S.N. Bulychev, A.I. Zvezdov. – M. : ASV Publishing House, 2019. – 312 p.
7. Savin N.S. Features of the Application of Carbon Fiber Tapes to Increase the Load-Bearing Capacity of Structures / N.S. Savin, A.N. Leonova // Science. Engineering. Technologies (Polytechnical Bulletin). – 2025. – № 2. – P. 158–161.