УДК 691

DOI: 10.37153/2618-9283-2022-4-47-57

Теоретические и экспериментальные исследования

Композиционные материалы в усилении железобетонных конструкций: виды, свойства, методы производства

Римшин В.И.[1,2], Пакулина Ю.А.[2]

[1]НИИСФ РААСН. Москва, Российская Федерация
[2]ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ». Москва, Российская Федерация

Аннотация: Статья посвящена актуальной проблеме современного строительства – проблеме усиления железобетонных конструкций.

Цель исследования: изучение, анализ, обобщение и систематизация разрозненной научной информации по вопросу усиления железобетонных конструкций композиционными материалами.

Материалы и методы: в статье анализируются характеристики различных композитов, используемых в усилении несущих железобетонных конструкций. В процессе работы были применены такие методы исследования как анализ, классификация и сравнение.

Научная новизна исследования заключается в поиске, обобщении и систематизации разрозненной информации по тематике работы.

Выводы: метод усиления железобетонных конструкций материалами на основе углекомпозитов – наиболее эффективный способ восстановления несущей способности элементов здания.

Ключевые слова: композитная арматура, повреждения, деформации, усиление, безопасность, конструкции, углекомпозит.

Для цитирования: Римшин В.И., Пакулина Ю.А. Композиционные материалы в усилении железобетонных конструкций: виды, свойства, методы производства. *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений.* 2022. № 4. С. 47–57.

DOI 10.37153/2618-9283-2022-4-47-57

Theoretical and experimental studies

Composite materials in reinforcement of reinforced concrete structures: types, properties, production methods

V.I. Rimshin[1,2], Yu.A. Pakulina[2]

[1] NIISF RAASN. Moscow, Russian Federation
[2] Federal state budget educational institution of higher education "National research Moscow state university of civil engineering" (NRU MGSU)
Moscow, Russian Federation

@ В.И. Римшин, Ю.А. Пакулина, 2022

Abstract: The article is devoted to the actual problem of modern construction - the problem of strengthening reinforced concrete structures.

The purpose of the study: study, analysis, generalization and systematization of disparate scientific information on the theme of strengthening reinforced concrete structures with composite materials.

Materials and methods: the article analyzes the characteristics of various composites used in the reinforcement of load-bearing reinforced concrete structures. In the process of work, such research methods as analysis, classification and comparison were applied. The scientific novelty of the study lies in the search, generalization and systematization of disparate information on the subject of the work.

Conclusion: the method of reinforcing reinforced concrete structures with materials based on carbon composites is the most effective way to restore the bearing capacity of building elements.

Keywords: composite reinforcement, damage, deformation, reinforcement, construction.

For citation: Rimsin V.I., Pakulina Yu.A. Composite materials in reinforcement of reinforced concrete structures: types, properties, production methods. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2022; no. 4, pp. 47–57.
DOI 10.37153/2618-9283-2022-4-47-57

Введение

С каждым днём количество зданий и сооружений, которые нуждаются в усилении и ремонте неуклонно увеличивается. Особенно остро данная ситуация ощущается на территории Российской Федерации. Жилой фонд, состоящий из массовой застройки железобетонными многоквартирными домами 70-х – 80-х гг. XX века, к настоящему времени обветшал и требует ремонта. Помимо времени существуют и иные внешние факторы, которые снижают несущую способность железобетонных конструкций. Не всегда возможно усиление железобетонных конструкций традиционными методами, такими как торкретирование, инъецирование и создание внешнего армирования металлом. В таких случаях единственным выходом может быть внешнее армирование легкими и тонкими композитными материалами [1-14]. В зарубежной литературе также освещаются исследования по вопросам усиления конструкций композитными материалами, обеспечивающими необходимую безопасность зданий и сооружений [15-19].

В статье рассматривается место и значение композитных материалов в усилении железобетонных конструкций зданий и сооружений, повышении безопасной эксплуатации зданий и сооружений. Анализируется и описывается сущность применяемых для этой цели композитных материалов, их виды, особенности, возникающие при изменении их состава, а также методы производства.

1. Виды композитов, использующихся для усиления железобетонных конструкций

Как известно, композиционными материалами называются виды материалов, созданные из двух и более видов компонентов. Данные материалы могут быть созданы как искусственно человеком, так и естественно в природе. Важной характеристикой композиционных материалов является то, что химические и/или физические свойства их компонентов отличаются, а их совмещение дает материал с новыми свойствами. В отличие от смесей и растворов, отдельные компоненты в полимерных материалах остаются таковыми. В макромасштабе материал выглядит однородно, однако, в микромасштабе чётко видна граница раздела компонентов.

В составе композитного материала традиционно выделяют матрицу и наполнитель. Вариативность количества каждого из составляющих композитного материала их положения друг относительно друга, позволяет получить материал с различными свойствами. Зачастую композиты куда крепче своих традиционных аналогов, но при этом имеют более низкую массу.

В зависимости от матрицы выделяют следующие виды композиционных материалов:

- с металлической матрицей;
- с неметаллической матрицей.

В первом случае, матрица чаще всего выполнена из алюминия, магния, никеля и их сплавов. В зависимости от того, какие материалы добавляются к матрице, композиционные материалы с металлической матрицей принято разделять на следующие виды:

- волокнистые (упрочнение высокопрочными волокнами);
- дисперсно-упрочнённые (упрочнение тугоплавкими частицами, которые не растворяются в основном материале);
- упрочнённые частицами (добавление частиц с низкой стоимостью для заполнения объёма).

Качественным отличием такого рода композитных материалов является длина, на которую передаётся нагрузка. Она меньше, чем у материалов с полимерной матрицей. Также композиты с металлической матрицей могут использоваться при значительно более высоких температурах и более эффективны в малогабаритных, но сильно нагруженных деталях. Свойства данного вида материала позволяют уменьшить массу соединительных узлов (использование резьбовых соединений и т.д.). Особенностью композитов с металлической матрицей является увеличение теплостойкости объединения матрицы и волокон в сравнении с матрицей неукреплённой волокнами.

Наиболее часто композиты с металлической матрицей используются в аэрокосмической отрасли, однако, в будущем возможно их применение в гражданском строительстве и в производстве наземного транспорта.

В композиционных материалах с неметаллической матрицей в качестве матрицы используются полимерные, углеродные и керамические материалы. Указанные матрицы упрочняются органическими, стеклянными, углеродными волокнами, также волокнами на основе нитевидных кристаллов (различные оксиды, бориды, нитриды, карбиды) или металлической проволокой.

Армирующие материалы могут быть разных форм: волокна, жгуты, нити, ленты, многослойные материалы.

Углеволоконные композиты используются в производстве более пятидесяти лет. Они применяются в ситуациях, когда их высокая гибкость и низкая масса являются большим преимуществом. История использования полимеров и композитов в строительстве берёт свое начало со времени Второй мировой войны. Впоследствии, в 1960-х годах значительно повысился интерес к технологии производства и использования волоконных полимерных композитов в строительстве.

Основное внимание в статье уделяется тем волокнистым композитам, которые в настоящее время используются для проектирования усиления конструкций. То есть, хотя возможны многие различные комбинации материалов (сочетания волокон и матрицы), здесь представлена лишь одна небольшая выборка из почти бесконечного числа возможностей. Для такого ряда композитов доступно несколько различных технологий производства, форм компонентов и конечных применений, но в данной статье рассматриваются только те из них, которые наиболее актуальны для проектирования усиления железобетонных конструкций. Более подробное обсуждение волокнистых композитов доступно в различных исследованиях по композитным материалам следующих авторов: Г. Икольд (1994), К.Т. Эркович (1998), Л.Х. Бэнк (2006) и другие.

2. Виды и характеристики волокон, используемых в композиционных материалах для усиления железобетонных конструкций

Композитные материалы из полимеров, армированных волокном, состоят из трех основных компонентов: волокон, полимеров и добавок. В волокнистых полимерных композитах волокна с высокой прочностью и высокой жесткостью встроены в низкомодульную непрерывную полимерную матрицу и связаны вместе. В случае волокнистых композитов, армирующие волокна составляют основу материала и определяют его прочность и жесткость в направлении волокон. Добавки включают пластификаторы, антипирены, пенообразователи, связующие вещества, другие компоненты, также в небольших количествах включают покрытия, пигменты и наполнители. Чтобы использовать весь потенциал композитов в конструкционных приложениях, необходимо понимать свойства и поведение их составляющих: волокон и матрицы.

Стеклянные волокна являются наиболее часто используемыми армирующими волокнами для композиционных материалов с полимерной матрицей. Расплавленное стекло можно вытягивать в непрерывные нити, которые связываются в жгуты. Покрытие стеклянных волокон связующим веществом обеспечивает гибкий слой на границе раздела, улучшает прочность соединения и уменьшает количество пустот в материале. Наиболее распространенные стекловолокна изготавливаются из E-стекла (отличается низкой электрической проводимостью), S-стекла (отличается высокой прочностью) и щелочестойкого стекла. E-стекло является наименее дорогим из всех типов стекла и широко используется в армированных стекловолокном конструкциях. S-стекло имеет более высокий предел растяжения и более высокий модуль упругости, чем E-стекло.

Рисунок 1 – Кривая напряжения-деформации для часто используемых в композитных материалах волокон: а – углеродное (высокий модуль упругости); б – углерод (высокая прочность); в – арамид (Kevlar 49); г – S-стекло; д – E-стекло

Figure 1 – Stress-strain curve for fibers often used in composite materials: a – carbon (high modulus of elasticity); b – carbon (high strength); c – aramid (Kevlar 49); d – S-glass; e – E-glass

Таблица 1 – Свойства различных волокон, используемых в композитных материалах

Table 1 – Properties of various fibers used in composite materials

Тип волокна	Плотность, кг/м^3	Предел прочности на разрыв, МПа	Модуль Юнга (модуль упругости), ГПа	Предельная деформация растяжения, %	Коэф. теплового расширения, 10^{-6}/□C	Коэф. Пуассона
E-стекло	2500	3450	72,4	2,4	5	0,22
S-стекло	2500	4580	85,5	3,3	2,9	0,22
Щелочестойкое стекло	2270	1800-3500	70-76	2,0-3,0	-	-
ECR-стекло (химически стойкое стекло)	2620	3500	80,5	4,6	5	0,22
Карбон (высокий модуль упругости)	1950	2500-4000	350-650	0,5	-1,2 □ -0,1	0,20
Карбон (высокая прочность)	1750	3500	240	1,1	-0,6 □ -0,2	0,20

Арамид (Kevlar 29)	1440	2760	62	4,4	- 2,0 продольный 59 радиальный	0,35
Арамид (Kevlar 49)	1440	3620	124	2,2	- 2,0 продольный 59 радиальный	0,35
Арамид (Kevlar 149)	1440	3450	175	1,4	- 2,0 продольный 59 радиальный	0,35
Арамид (Technora H)	1390	3000	70	4,4	- 6,0 продольный 59 радиальный	0,35
Арамид (SVM)	1430	3800-4200	130	3,5		-

Полимерные волокна при использовании подходящего метода обработки могут демонстрировать высокие прочность и жесткость. Это происходит в результате выстраивания полимерных цепей вдоль оси волокна. Арамид (сокр. ароматический полиамид) — это общий термин для длинных цепочек синтетических полиамид. Материал имеет самый низкий удельный вес и наименьшее отношение прочности на растяжение к весу среди современных армирующих волокон.

3. Виды и характеристики полимерных матриц, используемых в композиционных материалах для усиления железобетонных конструкций

Матрица в полимерном композите может рассматриваться и как структурный, и как защитный компонент. Смола представляет собой общий термин, используемый для обозначения полимера, материала-предшественника полимера и/или их смеси или состава с различными добавками, химически активными компонентами. Как правило, полимер называют системой смолы во время обработки и матрицей после отверждения полимера. Изготовление и свойства композитного материала в основном зависят от смолы, её химического состава и физических свойств. Материал матрицы обычно составляет от 30% до 60% по объему полимерного композита. Основными функциональными и структурными требованиями к матрице являются:

- связывание армирующих волокон в матрице;
- передача и распределение нагрузки между волокна;
- защита волокон от воздействия окружающей среды и механического истирания.

Следовательно, выбор матрицы имеет первостепенное значение при разработке композитной системы и будет влиять как на механические, так и на физические свойства конечного продукта.

Существует два основных класса полимерных матриц, используемых в волокнистых композитах: термореактивные и термопластичные смолы. Термореактивные смолы представляют собой полимеры, которые необратимо преобразуются из низкомолекулярных предшественников с низкой вязкостью. Термопласты — это

полимеры, не образующие поперечных связей. Они есть способность к изменению формы и неоднократному размягчению, и закалке путем воздействия на них температурных циклов, достигающих значений, превышающих температуру их формования.

4. Методика производства композиционных материалов для усиления железобетонных конструкций

Методы производства композитов могут быть как ручным, так автоматизированным процессом. При этом последние обеспечивают лучший контроль качества, чем первые.

Влажная укладка – это ручной метод, при котором сухая ткань или волокна мата сначала укладываются на субстрат или форму. Затем наносится смола и равномерно прокатывается по поверхности, чтобы удалить воздушные карманы. Это повторяется до получения необходимого количества слоев.

При структурном восстановлении форма представляет собой просто существующий элемент конструкции, который необходимо укрепить, а стеклопластик остается связанным с формой после отверждения (что обычно происходит при температуре окружающей среды). Этот метод имеет важное преимущество. Он легко и быстро выполняется в полевых условиях, обеспечивая значительные финансовые выгоды по сравнению с традиционными методами структурной реабилитации, такими как внешнее покрытие сталью. Однако при этой процедуре чрезвычайно важен контроль качества, и часто требуется квалифицированная рабочая сила. Мокрая укладка для структурной реабилитации бетонных колонны показана на рис. 2.

Рисунок 2 – Внешнее армирование колонны с использованием метода влажной укладки композитного материала

Figure 2 – External reinforcement of the column using the method of wet laying of composite material

Пултрузия – это автоматизированный, непрерывный производственный процесс. Возможности конструкции ограничиваются только сохранением неизменности профиля по длине объекта. Непрерывные волокна в форме ровинга (некручёная прядь из нитей) или мата протягивают через ванну со смолой, чтобы пропитать каждое волокно специально

приготовленной смеси смолы, как показано на рис. 3. Волокна с покрытием собираются формовочной направляющей, а затем протягиваются через нагретую головку. Нагрев в головке из катализатора в составе смолы инициирует отверждение термореактивной смолы. Зоны нагрева и охлаждения в головке контролируют скорость реакции. Полученный высокопрочный профиль нарезается по длине. На выходе из пултрузионной машины, профиль уже готов к использованию.

Рисунок 3 – Устройство пултрузионной машины

Figure 3 – Pultrusion machine device

Заключение

Подводя итог вышесказанному, можно утверждать, что усиление внешним армированием композитными материалами – это современный и эффективный способ восстановления несущей способности железобетонных конструкций. Многообразие составов композитов позволяет найти материал под нужды конкретного объекта. Композиционные материалы с полимерной матрицей отличаются лёгкостью, гибкостью и простотой монтажа. Такой метод усиления позволяет добиться восстановления несущей способности той или иной конструкции без изменения габаритов. Монтаж такого рода усилений не требует дорогостоящей и громоздкой техники. Сам процесс монтажа не сопровождается высоким уровнем шума и не доставляет неудобств людям, находящимся в соседних помещениях.

Список литературы

1. Римшин В.И., Геркулов С.И. Элементы теории развития бетонных конструкций с неметаллической композитной арматурой // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 5. С. 38–42.

2. Бондаренко В.М., Римшин В.И. Диссипативная теория силового сопротивления железобетона. Москва. 2015. 111 с.

3. Римшин В.И. Повреждения и методы расчета усиления железобетонных конструкций. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва. 2001.

4. Бондаренко В.М., Римшин В.И. Квазилинейные уравнения силового сопротивления и диаграмма σ - ε бетона // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2014. № 6. С. 40–44.

5. Бондаренко В.М., Римшин В.И. Остаточный ресурс силового сопротивления поврежденного железобетона // *Вестник отделения строительных наук РААСН*. 2005. № 9. С. 119 – 126.

6. Бондаренко В.М., Корнеских А.В., Марков А.В., Римшин В.И. Элементы теории реконструкции железобетона. Москва. 2002. 190 с.

7. Римшин В.И., Мелехов С.И. О нормировании характеристик стержневой неметаллической композитной арматуры // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 5. С. 22–26.

8. Мосаков Б.С., Курбатов В.Л., Римшин В.И. Основы технологической механики тяжелых бетонов. Минеральные Воды. 2017. 210 с.

9. Римшин В.И., Кустикова Ю.О. Теоретические основы расчета сцепления стеклобазальтопластиковой арматуры с бетоном // *Известия Орловского государственного технического университета*. Серия: Строительство. Транспорт. 2009. № 2–22. С. 29–33.

10. Римшин В.И., Бикбов Р.К., Кустикова Ю.О. Некоторые элементы усиления строительных конструкций композиционными материалами // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2005. № 10. С. 381–383.

11. Варламов А.А., Римшин В.И. Модели поведения бетона. Общая теория деградации. Москва. 2019. Сер.: Научная мысль. 436 с.

12. Обследование и испытание зданий и сооружений. Москва, 2013. Издание четвертое, переработанное и дополненное. 439 с.

13. Курбатов В.Л., Римшин В.И., Шубина Е.Ю., Дайронас М.В. Технологические процессы в строительстве. Учебное пособие. Москва. 2020. 601 с.

14. Техническая эксплуатация жилых зданий. Москва, 2012. 639 с.

15. Telichenko V., Rimshin V., Efremeev V., Kurbatov V. Mathematical modeling of groundwaters pressure distribution in the underground structures by cylindrical form zone. MATEC Web of Conferences. 2018. 02025

16. Karpenko N.I., Eryshev V.A., Rimshin V.I. The limiting values of moments and deformations ratio in strength calculations using specified material diagrams. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vladivostok. 2018. 032024

17. Rimshin V.I., Labudin B.V., Melekhov V.S., Orlov A., Kurbatov V.L. Improvement of strength and stiffness of components of main structures with foundation in wooden frame buildings. MIPN. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018, T. 13, no. 11, pp. 3851–3856

18. Telichenko V.I., Rimshin V.I., Karelskii A.V., Labudin B.V., Kurbatov V.L. Strengthening technology of timber trusses by patch plates with toothed plate connectors. *Journal of Industrial Pollution Control*. 2017, T. 33, no. 1, pp. 1034–1041

19. Kuzina E., Rimshin V. Deformation monitoring of road transport structures and facilities using engineering and geodetic techniques. International Scientific Conference Energy

Management of Municipal Transportation Facilities and Transport FMNPT 2017. *Conference proceedings*. Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham, 2018, pp. 410–416.

References

1. Rimshin V.I., Merkulov S.I. Elements of the theory of development of concrete structures with non-metallic composite reinforcement. *Industrial and civil engineering*. 2015, no. 5, pp. 38–42 [In Russian]

2. Bondarenko V.M., Rimshin V.I. Deformative theory of force resistance of fiber-concrete Moscow, 2015, 111 p. [In Russian]

3. Rimshin V.I. Damages and methods of calculation of reinforcement of reinforced concrete structures. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Moscow, 2001 [In Russian]

4. Bondarenko V.M., Rimshin V.I. Quasi-linear equations of force resistance and diagram σ - ε of concrete. *Structural mechanics of engineering constructions and buildings*. 2014, no. 6, pp. 40–44 [In Russian]

5. Bondarenko V.M., Rimshin V.I. Residual resource of force resistance of damaged reinforced concrete. *Bulletin of the Department of Construction Sciences of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences*. 2005, no. 9, p. 115 [In Russian]

6. Bondarenko V.M., Bolovskikh A.V., Markov S.V., Rimshin V.I. Elements of the theory of reinforced concrete reconstruction Moscow, 2002 [In Russian]

7. Rimshin V.I., Merkulov S.I. On the normalization of the characteristics of rod nonmetallic composite reinforcement. *Industrial and civil construction*. 2016, no. 5, pp. 22–26 [In Russian]

8. Mosakov B.S., Kurbatov V.L., Rimshin V.I. Fundamentals of technological mechanics of heavy concrete. Mineralnye Vody, 2017, 210 p. [In Russian]

9. Rimshin V.I., Kustikova Yu.O. Theoretical foundations for calculating the adhesion of glass-basalt-plastic reinforcement with concrete. *Izvestiya Oryol State Technical University*. Series: Construction and Transport, 2009, no. 2–3, pp. 29–33 [In Russian]

10. Rimshin V.I., Bikbov R.H., Kustikova Yu.O. Some elements of reinforcement of building structures with composite materials. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2005, no. 10, pp. 381–383 [In Russian]

11. Varlamov A.A., Rimshin V.I. Models of concrete behavior. General theory of degradation for students of engineering and construction faculties receiving education in the field of preparation 08.03.01 "Construction". Moscow, 2019. Publ. Scientific thought, 436 p. [In Russian]

12. Inspection and testing of buildings and structures. Moscow, 2013, 669 p.

13. Kurbatov V.L., Rimshin V.I., Shumilova E.Yu., Gironas M.V. Technological processes in construction. Textbook. Moscow, 2020, 601 p. [In Russian]

14. Technical operation of residential buildings. Moscow, 2012, 639 p.

15. Telichenko V., Rimshin V., Erofeev V., Kurbatov V. Mathematical modeling of groundwater pressure distribution in the underground structures by cylindrical form zone. *MATEC Web of Conferences*. 2018, 02023 [In Russian]

16. Karpenko N.I., Erisov V.A., Rimshin V.I. The limiting values of moments and deformations ratio in strength calculations using specified material diagrams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vladivostok, 2019, 032024 [In Russian]

17. Rimshin V.I., Labudin B.V., Melekhov V.I., Orlov A.A., Kurbatov V.L. Improvement of strength and stiffness of components of main struts with filling in wooden frame buildings.

ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018, vol. 13, no. 11, 3851-3856 [In English]

18. Tomilchenko V.I., Rimshin V.I., Karelskii A.V., Labudin B.V., Kurbatov V.L. Strengthening technology of timber trusses by patch plates with toothed-plate connectors. *Journal of Industrial Pollution Control*. 2017, vol. 33, no. 1, 1034–1041 [In English]

19. Kuzina E., Rimshin V. Deformation monitoring of road transport structures and facilities using engineering and geodetic techniques. International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. *Conference proceedings*. Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham, 2018, pp. 410–416 [In English]

Данные об авторах / Information about authors

Римшин Владимир Иванович, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник НИИСФ РААСН, заведующий лабораторией «Мониторинга жилищно-коммунального хозяйства и радиационной безопасности в строительстве» профессор кафедры ЖКК НИУ МГСУ v.rimshin@niisf.ru

Vladimir I. Rimshin, Corresponding Member of RAASN, Dr. Sc. Tech., Professor, Chief Researcher, NIISF RAASN, Professor of the Department of Housing and Communal Services, NRU MGSU v.rimshin@niisf.ru

Пакулина Юлия Алексеевна, магистр НИУ МГСУ pakulinaservice@yandex.ru

Yulia A. Pakulina, master of NRU MGSU pakulinaservice@yandex.ru