

УДК 691.87:693.554-422.2

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ В МАЛОЭТАЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Сергеева Е.А.

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»,
Казань, e-mail: prof.sergeeva@gmail.com

В работе показаны тенденции развития рынка сверхлегких высокопрочных волокон и перспективы их использования в композитной арматуре (КА). Объектом данного исследования является строительная арматура – как традиционная стальная арматура, так и из волокнистых полимерных композитов. Показано, что в связи с недостаточной проработанностью нормативной базы наибольшее использование КА получила в малоэтажном домостроении, конструктивные решения которого не требуют экспертиз и согласований. Выявлена недостаточность комплексных исследований, направленных на сравнительное обобщение свойств КА различной природы и их применимости в малоэтажном строительстве. Проведен анализ преимуществ и недостатков КА различной природы. Систематизированы характеристики различных типов КА и стали. Отмечено, что наибольшее распространение получила стеклопластиковая арматура в связи с меньшей стоимостью относительно других видов КА. Приведены преимущества и ограничения использования базальтовой, углеродной и арамидной КА. Несмотря на высокую стоимость такой арматуры относительно стеклопластиковой КА, она выдерживает большие изгибающие и растягивающие нагрузки, что позволяет использовать ее в ответственных строительных конструкциях и в сейсмоопасных регионах. Обоснованы направления рационального использования различных видов КА, в том числе гибридной, с модификацией поверхности волокнистого компонента для повышения прочности связи с полимерной матрицей.

Ключевые слова: сверхлегкое высокопрочное волокно, композитная арматура, сталь, стеклопластик, базальтопластик, углепластик, арамидопластик, гибридная арматура

JUSTIFICATION OF THE RATIONALITY OF USE OF COMPOSITE REINFORCEMENT IN LOW-RISE CONSTRUCTION

Sergeeva E.A.

Kazan National Research Technological University, Kazan, e-mail: prof.sergeeva@gmail.com

The trends in the development of the market for ultra-light high-strength fibers and the prospects for their use in composite reinforcement (CR) are shown. The object of this research is construction reinforcement, both traditional steel reinforcement and fiber polymer composites. It is shown that due to the insufficient elaboration of the regulatory framework, CR has received the greatest use in low-rise housing construction, the design solutions of which do not require examinations and approvals. The insufficiency of comprehensive studies aimed at comparative generalization of the properties of CR of various natures and their applicability in low-rise construction has been revealed. An analysis of the advantages and disadvantages of CR of various natures was carried out. The characteristics of various types of CR and steel are systematized. It is noted that fiberglass reinforcement is most widespread due to its lower cost relative to other types of CR. The advantages and limitations of using basalt, carbon and aramid CR are presented. Despite the high cost of such reinforcement, relative to fiberglass reinforcement, it can withstand large bending and tensile loads, which makes it possible to use it in critical building structures and in earthquake-prone regions. Directions for the rational use of various types of CR, including hybrid ones, with modification of the surface of the fibrous component to increase the bond strength with the polymer matrix are substantiated.

Keywords: ultra-light high-strength fiber, composite reinforcement, steel, fiberglass, basalt plastic, carbon plastic, aramid plastic, hybrid reinforcement

Волокнистые полимерные композиты (ВПК), активно используемые в военных целях, авиа- и ракетостроении, находят все большее применение в гражданских отраслях. Прогнозируется ежегодный прирост рынка ВПК на 11,3% в период до 2025 г. с преобладающей долей сегмента стекловолоконных композитов. Аналогичный прирост, но с меньшими долями рынка, ожидается в ряду «углепластик – базальтопластик – арамидопластик – другие волокнистые материалы, пропитанные полимерной матрицей» [1].

В массовом гражданском строительстве, в частности коттеджном, наиболее широкое применение ВПК получили в виде композитной арматуры (КА) различного назначения [2].

Объектом данного исследования является строительная арматура – как традиционная стальная арматура, так и из ВПК. Предметом исследования является выявление преимуществ и недостатков арматуры различной природы.

Следует отметить, что КА применяется для армирования бетона, в частности в смешанном армировании со стальной арматурой, в виде гибких связей в многослойных стеновых конструкциях, в зонах воздействия агрессивных сред, блуждающих токов и пр. Несмотря на то что КА имеет ряд преимуществ перед стальной арматурой (сочетание легкости и прочности, хемо- и коррозионной стойкости, термостабильности, диэлектрических свойств и др.),

в исследованиях отмечаются: недостаточные модуль упругости и огнестойкость, а также невозможность сварки и изготовления гнутых изделий на стройплощадке [3]. Такие особенности КА и необходимость некоторых изменений технологии строительства (повышение огнестойкости сооружений, заказ соединительных элементов или соединение прутков стяжками), ценовые барьеры по некоторым видам КА ограничивают масштабы перехода от стальной арматуры к композитной в многоэтажном строительстве.

Кроме того, ряд исследователей на основе анализа СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения», СП 164.132580.2014. «Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами», СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах» и других российских нормативных документов указывают на недостаточность как регламентирующей базы для расчета конструкций с КА взамен стальной, так и документально закрепленных требований контроля качества, методов испытаний, типовых решений, стандартизации изделий и т.д. [4]. Вследствие этого наибольшее использование КА получила в малоэтажном домостроении, конструктивные решения которого не требуют экспертиз и согласований. В связи с этим актуальными являются исследования, направленные на обоснование рациональности использования КА из различных ВПК и стали в малоэтажном строительстве.

Целью исследования является сравнительный анализ металлической и неметаллической КА. Для достижения цели решались задачи:

- анализа преимуществ и недостатков КА из ВПК различной природы;
- рассмотрения характеристик различных типов КА из ВПК;
- сравнения КА из ВПК с традиционной металлической арматурой.

Материалы и методы исследования

В ходе исследования накопленного научно-практического опыта применения КА в строительстве использовались теоретические (анализ, синтез, сравнение, обобщение, поиск противоречий) и эмпирические (ретроспективные изыскания, систематизация опыта) методы.

Вопросы использования ВПК, в частности в виде КА, применяемой для армирования бетонных сооружений, рассмотрены в работах: А. Авдеевой, Ю. Барабанщикова, Р. Бароева, И. Буторова, С. Дрокина, А. Дронова, Н. Макушевой, С. Меркулова, В. Старо-

верова, А. Степанова, А. Цурупы и других авторов.

Особенности КА на основе стекло-, базальто-, арамидо-, углеволокна, их свойства, направления применения, долговечность, способы монтажа и взаимодействие с бетоном исследованы в работах таких зарубежных авторов, как: С. Bakis, С. Burningham, J. Cheng, K. Ibrahim, B. Jarek, R. Sonnenschein, N. Țăranu, J. Zhang, и многих других.

Известно достаточное число исследований, направленных на изучение свойств КА на основе стекло- и базальтового волокна [2], арамида [5] и углеволокна, в том числе демонстрирующих результаты сравнительных испытаний отдельных ВПК и стальной арматуры, исследующих вопросы прочности сцепления арматуры с бетоном, а также способы крепления и соединения армирующих прутков [6]. Однако выявлена недостаточность комплексных исследований, направленных на сравнительное обобщение свойств ВПК различной природы и их применимости в малоэтажном строительстве.

Результаты исследования и их обсуждение

Применение КА в малоэтажном строительстве возможно в армировании фундаментов, при возведении монолитных стен с применением опалубочных конструкций, при возведении многослойных стеновых конструкций с гибкими связями, в процессе ремонта бетонных конструкций, при возведении мостовых сооружений и пролетов на опорах при прибрежном расположении малоэтажных комплексов.

В зависимости от состава КА различают арматуру на основе волокон неорганической природы (стеклянные, базальтовые, углеродные) и органических арамидных волокон, а также гибридную арматуру, включающую волокна различных типов. В качестве полимерных матриц используют эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые и другие смолы. Основной технологией получения КА является безфильтрная пултрузия.

Состав арматуры определяет ее свойства, кроме того, от типа волокон и распространенности технологий их производства зависит стоимость КА. В таблице 1 приведены сравнительные характеристики сверхлегких высокопрочных волокон, доступных на российском рынке для производства КА, и стали.

Согласно таблице 1, плотность волокон и, соответственно, вес КА убывают в ряду: сталь, базальтопластик, стеклопластик, углепластик, арамидопластик. Модуль упругости повышается в ряду: стеклопластик, базальтопластик – арамидопластик, сталь, углепластик.

Таблица 1

Сравнительные свойства волокон в составе КА и стали

Свойства	Углеволокно	Стекловолокно	Арамидное волокно	Базальтовое волокно	Сталь
Плотность, кг/м ³	1800–1900*	2530–2540	1440	2700	7850
Модуль упругости, ГПа	230–370	72–89	83–124	90	200
Прочность на разрыв, МПа	1790–2480	3400–4600	2920–3600	4000	500
Относительное удлинение, %	0,50–11	1,93–2,12	2,90–3,50	2,25	2,50

Примечание: по данным производителей; * – диапазоны значений в таблице 1 указывают на наличие нескольких марок волокна с различными характеристиками

Таблица 2

Сравнительные характеристики композитов армирующих стержней

Характеристики	Углепластик	Стеклопластик	Базальтопластик
Прочность на растяжение, МПа	2000–3000	1000	1200
Огнестойкость, 0С	От 600	До 300	До 600
Плотность, кг/м ³	1600	2200	2200
Устойчивость к коррозии	Высокая	Высокая	Высокая
Упругость, ГПа	До 350	До 45	До 50
Теплопроводность, Вт/(м·С)	От 1,0	До 1,0	До 1,0

Примечание: составлено по данным [9].

Прочность возрастает в ряду: сталь, углепластик, арамидопластик, стеклопластик, базальтопластик. Относительное удлинение (способность воспринимать растягивающие напряжения без хрупкого разрыва) повышается в ряду: углепластик, стеклопластик, базальтопластик, сталь, арамидопластик. Соответственно, достоинства материалов по одним характеристикам сочетаются с низкими значениями других.

Преимущества по стоимости относительно стали имеет только стеклопластиковая арматура [7], занимающая наибольшую долю рынка и наиболее востребованная в малоэтажном строительстве. Стоимость базальтопластиковой арматуры незначительно превышает стоимость стали, в то время как углепластик и арамидопластик демонстрируют существенно более высокую стоимость, что ограничивает их применение в малоэтажном строительстве.

Наибольшее применение ВПК нашли в производстве арматуры и других элементов малоэтажного строительства в экологически неблагоприятных промышленных районах химии, нефтехимии и металлургии, а также вблизи морской воды. В данном случае используют полимербетон, где вместо стальной арматуры применяется стойкая к коррозии композитная стекло-, базальто- или углепластиковая арматура, причем

последняя в 2 раза прочнее стеклопластиковой и до 6 раз прочнее стальной арматуры [8]. Среди российских производителей базальто- и стеклопластиковых армирующих стержней можно выделить ООО «Бийский завод стеклопластиков», ООО «Московский завод композитных материалов», ООО «Гален» и иные, а углепластиковой – ХК «Композит». Производство арамидного волокна в России под торговой маркой «Русар» направлено преимущественно на цели оборонно-промышленного комплекса, а недостаточные масштабы и высокая стоимость технологии производства волокна и конечных изделий в виде КА ограничивают их применение в строительстве.

Сравнительные характеристики армирующих стержней из различных типов композитов на основе угле-, стекло- и базальтовых волокон представлены в таблице 2.

Можно отметить наиболее высокую прочность на растяжение (в 2–3 раза), огнестойкость (в 2 раза выше стеклопластика) и упругость углепластика (≈ 7 раз) относительно стекло-, базальтопластика, в сочетании с более низкой плотностью (низким весом). Однако стоимость углеволоконной КА ограничивает ее широкое применение в малоэтажном строительстве.

По результатам исследования нескольких видов арматуры: базальтовой, углерод-

ной и стеклянной, посредством тестирования армированных ими бетонных элементов на сжатие вдоль армирующих стержней, с определением прочности и деформируемости бетонных элементов и сравнением со стальной арматурой получено, что армирование композитными стержнями приводит к повышению прочности на сжатие бетонных элементов и уменьшению их деформируемости. При испытаниях бетонных элементов с продольным армированием, где сжатие производилось поперек армирующих стержней, существенных отличий в несущей способности не обнаружено. Показано, что комбинированное использование арматуры из композитного стержня и армирующих волокон, распределенных в объеме бетонной композиции, позволяет достичь максимальной прочности и минимальной деформируемости образцов [10].

Установлено, что отдельные виды КА, используемые взамен стальной арматуры на территориях с повышенной угрозой коррозии, в частности когда в составе КА армирующее волокно имеет минеральную природу и наряду с высокой прочностью обладает хрупкостью и недостаточной эластичностью, ограничены к использованию в сейсмоопасных зонах. Непластичный отклик минеральной КА на динамические нагрузки предлагается устранять посредством создания гибридных композитов.

Гибридные армирующие стержни имеют различный состав: включают как непрерывные армирующие волокна, так и рубленое волокно с полимерной матрицей; имеют сердечник из стали или стеклопластика; включают углеродные, стеклянные и/или арамидные волокна. Показано, что сокращению затрат на производство стержня в сочетании с коррозионной стойкостью и устойчивостью к динамическим нагрузкам способствует конструкция со стальным сердечником (8 мм), с оплеткой из непрерывных арамидных и стеклянных волокон, с рубленным углеволокном в полимерной матрице, что позволяет использовать преимущества всех материалов в работе арматуры [11]. Для повышения прочности связи волокнистой компоненты с матрицей применяют различные способы модификации [12], в том числе плазменную активацию для лучшей адгезии высокопрочных волокон к смоле [13].

На примере КА на основе базальтовых волокон показано, что по сравнению с углеродными, стеклянными и другими композитами, а также сталью арматура имеет лучшее высокотемпературное сопротивление и низкую стоимость, более устойчива к коррозионным воздействиям, что важно

при малоэтажном строительстве вблизи морской воды. При возведении сооружений в рамках малоэтажного комплекса (мостовые палубы, гаражные элементы), на бетонных опорах, контактирующих с морской водой, где выполнено базальтовое армирование вместо стального, кроме коррозионной стойкости, отмечено повышение прочности и вязкости материала [14].

Также важным является значение диаметра армирующего стержня. Так, испытаниями на сжатие и методом pull-out (вытягивание стержня, на примере базальтовой арматуры) установлено, что с ростом диаметра КА выше 10 мм наблюдалось снижение прочности связи арматуры с бетоном. Для повышения адгезии КА к бетону предлагаются армирующие стержни, покрытые песком, что повышает коэффициент сцепления арматуры с бетоном, при этом с ростом коэффициента армирования данными стержнями повышается жесткость и снижается деформация бетонных образцов. Установлено, что бетон, армированный покрытым песком стеклопластиковым стержнем, имеет модуль упругости в 2 раза более высокий, чем стеклопластиковая арматура без песчаного покрытия [6].

При малоэтажном строительстве в условиях чрезвычайных ситуаций и в сейсмоопасных регионах перспективно изготовление КА из полиэтиленпластика, который превосходит по удельной прочности металлы в 6 раз, стеклопластики в 2,5 раза, углепластики в 1,6 раза, а также обладает повышенной стойкостью к ударным нагрузкам. В результате не происходит хрупкого разрушения композита, а наблюдается рассеяние энергии удара по волокнам из сверхвысокомолекулярного полиэтилена [15].

Заключение

Арматура из ВПК имеет преимущества перед стальными стержнями по удельной прочности, долговечности, коррозионной стойкости, диэлектрическим свойствам и пр. В малоэтажном строительстве наибольшее распространение получила стеклопластиковая КА в связи с низкой стоимостью и широкой доступностью на рынке. Применение КА более эффективно при возведении малоэтажных сооружений на территориях воздействия неблагоприятных факторов (нефтеперерабатывающие, химические предприятия), а также вблизи морских акваторий, где стальные стержни подвергаются коррозии. Диэлектрические свойства КА делают возможным малоэтажное строительство вблизи территорий с блуждающим током и электроосмосом. Возможность поглощать и рассеивать удар-

ные колебания открывает потенциал применения КА, в частности на основе органических полимеров, в сейсмоопасных регионах и зонах чрезвычайных ситуаций.

Для широкого применения КА необходимо дальнейшее совершенствование и масштабирование технологий их получения, так, чтобы повысить конкурентоспособность базальтопластика, арамидопластика и углепластика по цене относительно стали. Кроме того, необходимо стандартизировать методы оценки свойств, расчета конструкций, контроля качества изделий с применением КА. Для получения синергетического эффекта от сочетания свойств отдельных сверхлегких высокопрочных армирующих волокон перспективно проведение дальнейших исследований гибридных конструкций в целях повышения модуля упругости армированных сооружений с сохранением прочности и снижением стоимости.

Список литературы

1. Рынок волокнистых полимерных композитов будет расти до 2025 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://basalt.today/ru/2017/12/14065/> (дата обращения: 03.10.2023).
2. Алексеева Л.А., Игнатович А.В. Бетон с композитной арматурой в коттеджном строительстве // *Alfabuild*. 2017. № 1 (1). С. 16-26.
3. Габрусенко В.В. Особенности проектирования конструкций из бетона с композитной арматурой // *Проектирование и строительство в Сибири*. 2013. № 6(77). С. 20-24.
4. Бронников И.В. Композитная арматура – проблемы и перспективы применения // *Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral»*. 2019. № 3. С. 223-228.
5. Сергеева Е.А., Костина К.Д. Анализ ассортимента арамидных волокон и их свойств // *Вестник Технологического университета*. 2015. Т. 18, № 14. С. 124-125.
6. Shahad A.A. Jabbar, Saad B.H. Farid. Replacement of steel rebars by GFRP rebars in the concrete structures // *Karbala International Journal of Modern Science*. 2018. No. 4. P. 216-227.
7. Ширтанов А.А. Экономическая целесообразность применения композитной арматуры в строительстве // *Вестник науки*. 2023. Т. 3, № 11 (68). С. 195-200.
8. Costa L. Timber concrete composite floors with prefabricated Fiber Reinforced Concrete. Avdelningen för Konstruktionsteknik. Lunds Tekniska Högskola. Lunds Universitet, 2011. 189 p.
9. Окольникова Г.Э., Герасимов С.В. Перспективы использования композитной арматуры в строительстве // *Экология и строительство*. 2015. № 3. С. 14-21.
10. Nevskii A.V. et al. Strength and deformability of compressed concrete elements with various types of nonmetallic fiber and rods reinforcement under static loading // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2015. № 71. P. 012037. DOI: 10.1088/1757-899X/71/1/012037.
11. Behnam B., Eamon C. Analysis of alternative ductile fiber-reinforced polymer reinforcing bar concepts // *Journal of Composite Materials*. 2014. No. 48(6). P. 723-733.
12. Ершов И.П., Сергеева Е.А., Зенитова Л.А., Абдуллин И.Ш. Модификация синтетических волокон и нитей. Обзор // *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. Т. 15, № 18. С. 136-143.
13. Сергеева Е.А., Ибатуллина А.Р., Кадыров Ф.Ф. Повышение адгезионной способности сверхвысокомолекулярного полиэтиленового волокна с помощью плазменной обработки // *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. Т. 15, № 17. С. 123-126.
14. Þórhallsson E., Snæbjörnsson J. Basalt fibers as new material for reinforcement and confinement of concrete // *Solid State Phenomena*. Vol. 249. P. 79-84. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.249.79.
15. Сергеева Е.А. Регулирование свойств полиолефиновых волокон и нитей с помощью неравновесной низкотемпературной плазмы // *Химические волокна*. 2010. № 3. С. 24.