

About the authors:

KILIYANCHUK Yuri Vadimovich – Student of the Department of Production of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: psktstu@yandex.ru

PETROPAVLOVSKAYA Victoria Borisovna – Doctor of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

BELOV Vladimir Vladimirovich – Advisor to RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

TROFIMOV Valery Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: vitrofa@mail.ru

**УДК 691.542**

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ ВОЛОКНАМИ, В СТРОИТЕЛЬНЫХ РАСТВОРАХ ДЛЯ РЕМОНТА КОНСТРУКЦИЙ**

**А.А. Лаптев, Е.В. Ткач**

© Лаптев А.А., Ткач Е.В., 2024

***Аннотация.** В настоящее время особое внимание уделяется состоянию искусственных сооружений, необходимости проведения ремонтных работ и предупреждения разрушения искусственных сооружений. Эти цели могут быть достигнуты посредством проектирования, разработки, испытаний, оптимизации, а также применения ремонтных материалов или составов для предотвращения разрушения искусственных сооружений, подвергающихся влиянию различных разрушающих факторов. В статье рассматривается сверхвысокоэффективный цементирующий композит UHPFRC, армированный волокнами. Проанализированы его преимущества, такие как прочность, долговечность, трещиностойкость и водонепроницаемость.*

***Ключевые слова:** ремонтные составы, модифицированный тяжелый бетон, фибробетон, композитный материал, прочность, долговечность, водонепроницаемость, UHPFRC, оптимизация состава, устойчивость искусственных сооружений.*

Железобетонные конструкции различного назначения проектируются и возводятся во всем мире с середины прошлого века. В связи с этим больше половины из них имеют огромные сроки эксплуатации. Помимо сроков эксплуатации, нагрузки и воздействия могут меняться во времени и пространстве, т.е. изменяться по величине, режиму, области приложения и направлению. Кроме того, следует учитывать, что при проектировании, изготовлении конструкций, их монтаже и реконструкции, осуществляемых с учетом нормативных требований и по предусмотренным в проектах технологиям или с их нарушением, возникают и накапливаются предшествующие периоду эксплуатации дефекты, влияющие на силовое сопротивление зданий и сооружений. Часто эти дефекты меняют характеристики элементов конструкций и их соединений.

Одной из главных проблем при проектировании и строительстве искусственных сооружений является недостаточный запас прочности. Эта характеристика закладывается еще на стадии проектирования сооружения и должна быть полностью учтена во время производства строительных или ремонтных работ. Запас прочности необходим любому сооружению для сопротивления ненормативным нагрузкам и преодоления ситуаций, в которых возможен выход из строя одного или нескольких элементов конструкции, влекущий за собой ее полное разрушение.

При этом традиционные решения по ремонту и усилению искусственных сооружений с использованием бетона или ремонтного раствора не всегда обеспечивают достаточную долговечность, а значит, необходимо прилагать усилия для разработки эффективных, экономичных, экологичных материалов с требуемыми характеристиками. К таким материалам можно отнести высокоэффективные армированные волокнами композитные материалы на основе цементного вяжущего.

Материалы подобного типа обладают значительными прочностными свойствами, устойчивостью, водонепроницаемостью, сопротивляемостью агрессивной окружающей среде и проникновению ионов хлора, что положительно влияет на вымывание цементного камня из исследуемой конструкции. Высокоэффективные армированные волокнами композитные материалы на основе цементного вяжущего отлично зарекомендовали себя, проявив высокую пластичность и долговечность при землетрясениях и усталостных нагрузках. Однако им также присущи определенные недостатки, а именно:

углеродный след (влияние входящих в состав материалов на экологию);

высокая стоимость по сравнению с классическими составами.

Сверхвысокоэффективный армированный волокнами цементный композит UHPFRC может использоваться для улучшения существующих конструкций и проектирования новых инновационных конструкций. Его конструкционная прочность на сжатие и растяжение в

3–5 раз выше, чем у обычного бетона. Благодаря своей способности к деформационному упрочнению и плотной матрице конструкции из UHPFRC отличаются высокой трещиностойкостью и водонепроницаемостью, что гарантирует их долговечность.

Авторы рассматривают взаимодействие различных модификаций высокоэффективных армированных волокнами композитных материалов на основе цементного вяжущего на устойчивость искусственных сооружений, включая результаты параметрического исследования, влияние третьего предельного состояния и предела прочности на растяжение [1].

Первоначально для исследования механических характеристик мостов был выполнен анализ с использованием метода конечных элементов. Было выявлено, что разработанный состав обладает уникальными свойствами и большей прочностью на растяжение.

Затем проводилось исследование устойчивости. Под устойчивостью понимается способность сооружения поддерживать необходимый уровень надежности во время или после экстремального события, а также возможность восстановления необходимой надежности в кратчайшие сроки.

В задачу исследователей входила многоцелевая оптимизация, которая заключалась в улучшении механических свойств состава, минимизации его стоимости и углеродного следа.

Исследование, составление расчетной схемы и подбор необходимого состава производились на основе вантового моста общей длиной 83,2 м. Пролет состоял из предварительно напряженной бетонной ферменной конструкции. Согласно заключению судебной строительно-технической экспертизы, при проектировании данного искусственного сооружения были допущены ошибки, связанные с недооценкой требований по грузоподъемности и пропускной способности, что впоследствии привело к появлению дефектов в приопорных участках балки и ее дальнейшему разрушению.

Основной проблемой во время строительства стали холодные швы, которые не были предварительно обработаны.

Оценка устойчивости проводилась на основании экономических показателей всего цикла производимых работ и углеродного следа исследуемого состава. При этом ряд возможных составов был выбран на основе результатов параметрического исследования. Высокая прочность на сжатие достигалась за счет использования смесей с прочностью на сжатие выше 58,5 МПа.

В исследовании [2] представлена основа для одновременного повышения упругости и устойчивости искусственных сооружений с применением модифицированных высокоэффективных армированных волокнами композитных материалов на цементном вяжущем за счет оптимизации смеси. Было выявлено, что модифицированные смеси могут быть спроектированы таким образом, чтобы уменьшить стоимость работ

и материалов и минимизировать углеродный след, сохранив при этом необходимые механические характеристики.

Предлагаемый путь уменьшения повреждений мостов и повышения устойчивости к разрушению в условиях экстремальных нагрузок является перспективным. Что касается рассмотренного примера моста, то при замене обычного бетона на УНРС повреждения при растяжении были снижены до незначительных [2].

В исследовании проверяется возможность использования предлагаемой основы для повышения устойчивости мостов за счет оптимизации конструкционных материалов. Влияние высокопроизводительных цементных композитов, армированных волокном (HPFRCC), на стоимость жизненного цикла и долговечность объекта остается неизвестным. Необходимы дальнейшие исследования, чтобы выявить возможные проблемы, снизить стоимость производства работ и повысить долговечность. При этом следует учитывать свойство самовосстановления бетона.

Данное исследование фокусируется на этапах строительства до обрушения моста. Хотя использование HPFRCC дает возможность избежать обрушения моста, неясно, не произойдет ли обрушение на более позднем этапе. В будущих исследованиях необходимо учитывать весь жизненный цикл, чтобы получить целостное представление о безопасности и упругости мостов.

Армированные волокном высокопроизводительные цементные композиты (HPFRCC) продемонстрировали высокую пластичность и отличную долговечность при сейсмических и усталостных нагрузках [3]. Типичными представителями HPFRCC являются бетон сверхвысоких эксплуатационных характеристик (УНРС) [4, 5] и деформационно-твердеющие цементные композиты (SHCC) [6, 7]. Как УНРС, так и SHCC обладают высокой пластичностью и используют рубленые волокна для перекрытия трещин в HPFRCC. Проведенные исследования показали, что волокна повышают трещиностойкость, а при незначительном растрескивании позволяют HPFRCC выдерживать более высокие нагрузки. Композит УНРС предназначен для достижения высокой механической прочности ( $>120$  МПа при сжатии) за счет максимизации плотности упаковки частиц [8–12], тогда как SHCC может использоваться для достижения высокой пластичности ( $>3$  % при растяжении) путем настройки интерфейса «волокно – матрица» [13]. Композиты SHCC обладают многофункциональностью, в том числе способны к самовосстановлению [14] и самоочистке.

Исследования показали, что замена обычного бетона на УНРС или SHCC улучшила трещиностойкость, прочность на изгиб, прочность на сдвиг и усталостную долговечность балок, плит, колонн и соединений [3–5, 7]. Треснувшие элементы конструкции могли выдерживать более

высокие нагрузки, прежде чем они вышли из строя. На основе предыдущих исследований предполагается, что использование HPFRCC в мостах повысит их устойчивость.

Использование цементных композитов, армированных волокнами, в строительных растворах для ремонта конструкций представляется весьма перспективным. Сверхвысокоэффективный армированный волокнами цементирующий композит (UHPRC) обладает такими преимуществами, как прочность, долговечность, трещиностойкость и водонепроницаемость, что делает его идеальным материалом для предотвращения разрушения искусственных сооружений.

Однако традиционные решения по ремонту и усилению искусственных сооружений с использованием бетона или ремонтного раствора недостаточно долговечны, что требует разработки эффективных, экономичных, экологичных материалов, соответствующих необходимым характеристикам. В этом плане высокоэффективные армированные волокнами композитные материалы на основе цементного вяжущего являются отличной альтернативой. Они характеризуются высокой прочностью, устойчивостью, водонепроницаемостью, сопротивляемостью агрессивной окружающей среде.

Как отмечено выше, минусами композитных материалов на основе цементного вяжущего являются углеродный след и высокая стоимость.

Сверхвысокоэффективный армированный волокнами цементирующий композит позволяет улучшить существующие конструкции и проектирование новых инновационных конструкций. Конструкционная прочность UHPRC на сжатие и растяжение в 3–5 раз выше, чем у обычного бетона. Благодаря плотной матрице и способности к деформационному упрочнению, конструкции из UHPRC отличаются трещиностойкостью и водонепроницаемостью, что служит залогом их долговечности.

### **Библиографический список**

1. Optimizing high-performance fiber-reinforced cementitious composites for improving bridge resilience and sustainability / X. Tan [et al.] // *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*. 2023. № 4.

2. Cyclic behavior of damaged reinforced concrete columns repaired with high-performance fiber-reinforced cementitious composite / X. Li [et al.] // *Engineering Structures*. 2017. № 136 (2), pp. 26–35.

3. Transverse fatigue behaviour of steel-UHPC composite deck with large-size U-ribs / L. Yiming [et al.] // *Engineering Structures*. 2019. № 180, pp. 388–399.

4. Meng W., Khayat K.H. Mechanical properties of ultra-high-performance concrete enhanced with graphite nanoplatelets and carbon nanofibers // *Composites Part B Engineering*. 2016. 107, pp. 113–122.

5. Мэн В., Хаят К.Х., Бао Ю. Изгибное поведение высокоэффективных бетонных панелей, армированных волокнистой полимерной тканью // Цемент и бетонные композиты. 2018. № 93. С. 43–53.
6. Хуан Б.Т., Дж. Ю., Ву ЖК, Дай ЖГ, Люн СК, Композиты на основе морской воды и морского песка (SS-ECC) для морского и прибрежного применения // Композитные коммуникации. 2020. № 20.
7. Huang B.-T., Wang Y.-T., Wu J.-Q., Yu J. Effect of fiber content on mechanical performance and cracking characteristics of ultra-high-performance seawater sea-sand concrete (UHP-SSC) // Advances in Structural Engineering. 2021. № 24 (6), pp. 1182–1195.
8. Мэн В., Валипур М., Хаят К.Х. Оптимизация и производительность экономичного бетона со сверхвысокими эксплуатационными характеристиками // Материалы и конструкции. 2017. № 50 (1).
9. Прейс А., Джаудхари А., Фам А. Прочность выдергивания установленных разъемов в тонких элементах УНРС // Тонкостенные конструкции. 2022. № 181.
10. Поведение железобетонных балок, усиленных при изгибе гибридными накладками УНРС, армированными углепластиком / М.М. Кадхим [и др.] // Инженерные сооружения. 2022. № 262.
11. Kadhim M.M.A., Jawdhari A., Peiris A. Development of hybrid UHPC-NC beams: A numerical study // Engineering Structures. 2021. № 233.
12. Jawdhari A., Fam A. Thermal-Structural Analysis and Thermal Bowing of Double Wythe UHPC Insulated Walls // Energy and Buildings. 2020. № 223 (2).
13. Influence of TiO<sub>2</sub> incorporation methods on NO<sub>x</sub> abatement in Engineered Cementitious Composites / M. Xu [et al.] // Construction and Building Materials. 2019. № 221 (2), pp. 375–383.
14. Herbert E.N., Li V. Self-Healing of Microcracks in Engineered Cementitious Composites (ECC) Under a Natural Environment // Materials. 2013. № 6 (7), pp. 2831–2845.

## **PROSPECTS FOR THE USE OF FIBER-REINFORCED CEMENT COMPOSITES IN BUILDING SOLUTIONS FOR STRUCTURAL REPAIRS**

**A.A. Laptev, E.V. Tkach**

***Abstract.** Currently, special attention is being paid to the condition of artificial structures, the need for repair work and prevention of destruction of artificial structures. These goals can be achieved through design, development, testing, optimization, as well as the use of repair materials or formulations to prevent the destruction of artificial structures affected by various destructive*

*factors. The article discusses the ultra-high-efficiency UHPFRC fiber-reinforced cementing composite. Its advantages such as strength, durability, crack resistance and water resistance are analyzed.*

**Keywords:** repair compounds, modified heavy concrete, fiber concrete, composite material, strength, durability, water resistance, UHPFRC, composition optimization, stability of artificial structures.

Об авторах:

ЛАПТЕВ Александр Александрович – аспирант, ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», Москва. E-mail: alexandrlaptev908@gmail.com

ТКАЧ Евгения Владимировна – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», Москва. E-mail: ev\_tkach@mail.ru

About the authors:

LAPTEV Alexander Alexandrovich – Postgraduate Student, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow. E-mail: alexandrlaptev908@gmail.com

TKACH Evgeniya Vladimirovna – Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow. E-mail: ev\_tkach@mail.ru

**УДК 691.535**

## **РАЗРАБОТКА СОСТАВА КОМПОЗИЦИОННОГО ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ**

**И.А. Лесников, Т.Б. Новиченкова,  
В.Б. Петропавловская, Е.В. Смирнова**

© Лесников И.А., Новиченкова Т.Б.,  
Петропавловская В.Б., Смирнова Е.В., 2024

***Аннотация.** В статье представлены результаты разработки композиционного гипсового вяжущего для строительной 3D-печати. Большинство строительных смесей непригодно для использования в строительной 3D-печати, поскольку не обладают достаточной прочностью на сжатие. Композиционные смеси для 3D-печати используют в специальных принтерах, поэтому они должны*