УДК 69

ИННОВАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ФУНДАМЕНТОВ: ПРОРЫВ В ДОЛГОВЕЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ

♦♦♦♦♦

INNOVATIVE MATERIALS IN FOUNDATION CONSTRUCTION: BREAKTHROUGH IN DURABILITY AND SUSTAINABILITY

Ляшова Анастасия Андреевна
студентка,
Кубанский государственный технологический университет
Anastasialashova83885@gmail.com

Дизенко Светлана Ивановна
кандидат технических наук,
доцент кафедры,
Кубанский государственный технологический университет

Аннотация. Настоящая научная статья посвящена всестороннему исследованию применения инновационных материалов в строительстве фундаментов зданий и сооружений. В работе проведен глубокий анализ передовых разработок в области геополимерных бетонов, фибробетонов (стальных, полимерных, углеродных и базальтовых), легких бетонов, композитных материалов на основе высокопрочных волокон, самовосстанавливающихся бетонов и аддитивных технологий (3D-печати) в контексте фундаментного строительства. Рассмотрены их физико-механические свойства, преимущества и недостатки, а также влияние на прочность, долговечность, экологичность и экономическую эффективность фундаментных конструкций. Особое внимание уделено примерам успешного внедрения инновационных материалов в реальных строительных проектах и результатам соответствующих научных исследований, подтверждающих их потенциал.

Ключевые слова: инновационные материалы, фундаменты, геополимерный бетон, фибробетон, легкий бетон, композитные материалы, углеродное волокно, базальтовое волокно, самовосстанавливающийся бетон, 3D-печать, строительство, прочность, долговечность, экологичность, экономическая эффективность, исследования, примеры.

Lyashova Anastasia Andreevna
student,
Kuban State Technological University
Anastasialashova83885@gmail.com

Dizenko Svetlana Ivanovna
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department,
Kuban State Technological University

Annotation. This scientific article is devoted to a comprehensive study of the use of innovative materials in the construction of foundations of buildings and structures. The paper provides an in-depth analysis of advanced developments in the field of geopolymer concretes, fiber-reinforced concrete (steel, polymer, carbon and basalt), lightweight concrete, composite materials based on high-strength fibers, self-healing concrete and additive technologies (3D printing) in the context of foundation construction. Their physical and mechanical properties, advantages and disadvantages, as well as their impact on the strength, durability, environmental friendliness and economic efficiency of foundation structures are considered. Special attention is paid to examples of successful implementation of innovative materials in real construction projects and the results of relevant scientific research confirming their potential.

Keywords: innovative materials, foundations, geopolymer concrete, fibreglass, lightweight concrete, composite materials, carbon fiber, basalt fiber, self-healing concrete, 3D printing, construction, strength, durability, environmental friendliness, economic efficiency, research, examples.

Фундамент, являясь основанием любого сооружения, играет ключевую роль в обеспечении его стабильности, безопасности и долговечности. Традиционно в фундаментном строительстве доминируют тяжелые бетоны на основе портландцемента и железобетонные конструкции. Несмотря на их проверенную временем надежность, они обладают рядом существенных недостатков, включая значительный вес, высокие затраты на транспортировку и монтаж, подверженность коррозии арматуры, а также существенный углеродный след, связанный с производством цемента.

В условиях растущих требований к устойчивому развитию, энергоэффективности и долговечности строительных объектов, поиск и внедрение инновационных материалов в фундаментное строительство становится не просто актуальным, а необходимым. Новые материалы и технологии способны обеспечить улучшенные эксплуатационные характеристики фундаментов, снизить их стоимость, уменьшить негативное воздействие на окружающую среду и открыть новые возможности для реализации сложных архитектурных проектов.

Настоящая статья представляет собой обзор наиболее перспективных инновационных материалов, применяемых или находящихся на стадии активного исследова-

ния для использования в строительстве фундаментов. В работе будут рассмотрены их основные характеристики, результаты научных исследований, подтверждающие их эффективность, а также примеры их практического применения в различных строительных проектах.

1. *Геополимерные бетоны: революция в экологичности и долговечности*

Геополимерные бетоны представляют собой класс цементоподобных материалов, получаемых путем активации алюмосиликатных источников (таких как доменный шлак, зола-унос, метакаолин) щелочными растворами. В отличие от традиционного портландцемента, производство геополимеров характеризуется значительно меньшим выбросом углекислого газа (до 80–90 %), что делает их экологически более привлекательной альтернативой.

1.1 *Исследования свойств геополимерных бетонов*

Многочисленные исследования подтверждают высокие эксплуатационные характеристики геополимерных бетонов. Так, работа показала, что геополимерные бетоны на основе доменного шлака демонстрируют более высокую прочность на сжатие и изгиб по сравнению с контрольными образцами цементного бетона аналогичного класса. Исследование выявило превосходную стойкость геополимерных бетонов к воздействию агрессивных сред, включая кислоты и сульфаты, что особенно важно для фундаментов, эксплуатируемых в сложных грунтовых условиях. Морозостойкость геополимерных бетонов также была подтверждена в ряде работ, например, где образцы выдержали значительное количество циклов замораживания-оттаивания без существенной потери прочности.

1.2 *Применение геополимерных бетонов в фундаментном строительстве: примеры*

Хотя применение геополимерных бетонов в фундаментном строительстве находится на относительно ранней стадии, уже существуют успешные примеры их использования. В Австралии был реализован проект строительства промышленного здания, фундамент которого был выполнен с использованием геополимерного бетона на основе золы-уноса. Результаты мониторинга показали высокую прочность и долговечность конструкции. В Европе проводятся экспериментальные работы по использованию геополимерных свай для усиления слабых грунтов. Предварительные результаты свидетельствуют о высокой несущей способности и устойчивости таких свай.

2. *Фибробетоны: повышение трещиностойкости и ударной вязкости*

Фибробетоны представляют собой композиционные материалы, в которых бетонная матрица армирована дисперсно расположенными волокнами. В зависимости от типа волокна (стальные, полимерные, углеродные, базальтовые) фибробетоны приобретают улучшенные механические свойства, особенно в отношении трещиностойкости, ударной вязкости и сопротивления растяжению.

2.1 *Сталефибробетон*

Добавление стальных волокон в бетонную смесь приводит к значительному повышению прочности на изгиб, сопротивления сдвигу и ударной вязкости. Исследование показало, что использование сталефибробетона в фундаментных плитах позволяет уменьшить их толщину и снизить расход бетона без потери несущей способности. Применение сталефибробетонных свай также демонстрирует повышенную устойчивость к динамическим нагрузкам.

2.2 *Полимерфибробетон*

Полимерные волокна (полипропиленовые, полиэфирные) улучшают стойкость бетона к образованию трещин на ранней стадии твердения и повышают его морозостойкость. Исследование выявило, что применение полипропиленовых волокон в бетоне фундаментных ростверков снижает риск образования усадочных трещин и повышает их долговечность в условиях циклического замораживания-оттаивания.

2.3 *Углеродный и базальтовый фибробетон*

Углеродные и базальтовые волокна обладают высокой прочностью на растяжение и коррозионной стойкостью. Их использование в фибробетонах позволяет создавать легкие и высокопрочные фундаментные элементы. Исследование показало, что

углеродное волокно значительно повышает предел прочности на изгиб бетонных балок, что может быть эффективно использовано в предварительно напряженных фундаментных конструкциях. Базальтовое волокно, обладая более низкой стоимостью по сравнению с углеродным, также демонстрирует многообещающие результаты в повышении трещиностойкости и долговечности бетона.

2.4 *Применение фибробетонов в фундаментном строительстве: примеры*

Сталефибробетон широко применяется в строительстве промышленных полов и фундаментных плит, подверженных высоким нагрузкам. Например, при строительстве логистических центров и складских комплексов использование сталефибробетонных фундаментных плит позволило сократить сроки строительства и снизить затраты на армирование. Полимерфибробетон успешно используется в строительстве малоэтажных зданий для устройства ленточных фундаментов и фундаментных плит, обеспечивая повышенную трещиностойкость и долговечность. Экспериментальные проекты с использованием углеродного и базальтового фибробетона в фундаментных конструкциях пока находятся на стадии исследований и пилотных проектов, но демонстрируют высокий потенциал для будущего применения в условиях, требующих высокой прочности и коррозионной стойкости.

3. *Легкие бетоны: снижение нагрузок и улучшение теплоизоляции*

Легкие бетоны получают с использованием пористых заполнителей (керамзит, перлит, пемза, вспученный вермикулит) и характеризуются пониженной плотностью по сравнению с традиционными тяжелыми бетонами. Их применение в фундаментном строительстве позволяет снизить нагрузку на основание, уменьшить затраты на транспортировку и монтаж, а также улучшить теплоизоляционные характеристики фундаментов.

3.1 *Исследования свойств легких бетонов*

Исследование показало, что легкие бетоны на основе керамзита обладают достаточной прочностью на сжатие для использования в малоэтажном строительстве и демонстрируют хорошие теплоизоляционные свойства. Работа выявила, что применение легких бетонов в конструкциях фундаментных плит позволяет снизить передачу холода от грунта к надземной части здания, что приводит к снижению затрат на отопление. Однако, прочность легких бетонов, как правило, ниже, чем у тяжелых, что необходимо учитывать при проектировании несущих конструкций.

3.2 *Применение легких бетонов в фундаментном строительстве: примеры*

Легкие бетоны широко используются в малоэтажном строительстве для устройства ленточных фундаментов и фундаментных плит на слабых грунтах, где снижение нагрузки на основание является критически важным. В регионах с холодным климатом применение легких бетонов с улучшенными теплоизоляционными свойствами позволяет значительно повысить энергоэффективность зданий. Также существуют примеры использования легких бетонов в качестве заполнителя при устройстве свайных ростверков, что позволяет снизить их вес и облегчить монтаж.

4. *Композитные материалы на основе высокопрочных волокон: замена традиционной арматуры*

Композитные материалы на основе высокопрочных волокон (углеродное волокно, стекловолокно, базальтовое волокно) обладают рядом преимуществ перед традиционной стальной арматурой, включая высокую прочность на растяжение, малый вес и абсолютную коррозионную стойкость. Их применение в качестве армирующих элементов в фундаментных конструкциях позволяет создавать более легкие, долговечные и экономичные решения, особенно в условиях агрессивных сред.

4.1 *Исследования композитной арматуры*

Многочисленные исследования подтверждают эффективность композитной арматуры. Работа показала, что углеродные волокна обладают прочностью на растяжение в несколько раз превышающей прочность стали. Исследование выявило высокую коррозионную стойкость стеклопластиковой арматуры в хлоридной среде, что делает ее идеальным выбором для фундаментов, расположенных вблизи морского побережья или подверженных воздействию противогололедных реагентов. Базальтовая арматура

также демонстрирует высокую прочность и коррозионную стойкость при более низкой стоимости по сравнению с углеродной и стеклопластиковой.

4.2 *Применение композитной арматуры в фундаментном строительстве: примеры*

Композитная арматура успешно применяется в строительстве фундаментных плит, ленточных фундаментов и свайных ростверков, особенно в условиях, где коррозия стальной арматуры представляет серьезную проблему. Например, при строительстве портовых сооружений и мостов использование стеклопластиковой арматуры в фундаментах позволило значительно увеличить их долговечность. В малоэтажном строительстве применение базальтовой арматуры в ленточных фундаментах и фундаментных плитах позволяет снизить вес конструкций и упростить процесс монтажа.

5. *Самовосстанавливающиеся бетоны: революция в долговечности и снижении затрат на ремонт*

Самовосстанавливающиеся бетоны представляют собой инновационные материалы, способные залечивать образующиеся в них трещины без внешнего вмешательства. Это достигается за счет введения в бетонную смесь специальных добавок, таких как бактерии, споры грибов или микрокапсулы с заживляющим составом (например, полимерным клеем).

5.1. *Исследования самовосстанавливающихся бетонов*

Исследование показало, что бактерии рода Bacillus, инкапсулированные в бетонную смесь, способны выделять карбонат кальция при появлении трещин, заполняя их и восстанавливая герметичность конструкции. Работа продемонстрировала эффективность использования микрокапсул с полимерным клеем для залечивания трещин в бетоне, что приводит к восстановлению его прочности и водонепроницаемости.

5.2 *Потенциал применения самовосстанавливающихся бетонов в фундаментном строительстве*

Применение самовосстанавливающихся бетонов в фундаментном строительстве имеет огромный потенциал для повышения долговечности и снижения затрат на ремонт. Фундаменты, постоянно находящиеся в контакте с грунтом и подземными водами, подвержены риску образования трещин из-за осадок, температурных колебаний и воздействия агрессивных сред. Использование самовосстанавливающихся бетонов позволит автоматически устранять мелкие трещины, предотвращая их дальнейшее развитие и проникновение влаги и агрессивных веществ к арматуре, тем самым значительно продлевая срок службы фундаментов. Хотя технология находится на стадии активного развития и внедрения, первые экспериментальные проекты демонстрируют многообещающие результаты.

6. *Аддитивные технологии (3D-печать) в строительстве фундаментов: новые формы и скорость возведения*

Аддитивные технологии, или 3D-печать, открывают новые возможности в строительстве фундаментов, позволяя создавать сложные геометрические формы, оптимизировать расход материала и значительно ускорить процесс возведения.

6.1 *Исследования* 3D-печати бетоном

Исследования в области 3D-печати бетоном активно ведутся по всему миру. Работа продемонстрировала возможность печати бетонных элементов сложной формы с высокой точностью и скоростью. Исследование показало, что 3D-печать позволяет оптимизировать внутреннюю структуру бетонных элементов, снижая их вес и расход материала без потери прочности.

6.2 *Потенциал применения 3D-печати в фундаментном строительстве*

В фундаментном строительстве 3D-печать может быть использована для создания опалубки сложной формы, что позволит реализовать нестандартные архитектурные решения. Также существует потенциал для печати отдельных элементов фундаментов, таких как сваи или блоки, непосредственно на строительной площадке, что может значительно сократить сроки строительства и транспортные расходы. Хотя применение 3D-печати в фундаментном строительстве находится на начальной стадии, первые экспериментальные проекты демонстрируют многообещающие результаты в плане скорости и точности возведения.

7. *Экономическая эффективность и экологические аспекты применения инновационных материалов*

Внедрение инновационных материалов в фундаментное строительство не только улучшает технические характеристики конструкций, но и оказывает значительное влияние на их экономическую эффективность и экологическую устойчивость.

7.1 *Экономическая эффективность*

Несмотря на то, что некоторые инновационные материалы могут иметь более высокую стоимость на начальном этапе, их применение может привести к снижению общих затрат за счет:

- Уменьшения расхода материала (например, за счет использования высокопрочных бетонов и композитной арматуры);
- Сокращения сроков строительства (например, за счет использования 3D-печати и быстротвердеющих бетонов);
- Снижения затрат на транспортировку и монтаж (например, за счет использования легких бетонов и композитных материалов);
- Увеличения срока службы конструкций и снижения затрат на ремонт и обслуживание (например, за счет использования самовосстанавливающихся бетонов и коррозионностойких материалов).

7.2 *Экологические аспекты*

Применение инновационных материалов способствует снижению негативного воздействия строительной отрасли на окружающую среду за счет:

- Уменьшения выбросов углекислого газа при производстве материалов (например, при использовании геополимерных бетонов);
- Снижения потребления природных ресурсов (например, за счет использования вторичных материалов и оптимизации расхода материалов);
- Уменьшения количества строительных отходов за счет применения аддитивных технологий и увеличения срока службы конструкций.

Вывод: инновационные материалы открывают новую эру в строительстве фундаментов, предлагая значительные преимущества в плане прочности, долговечности, экологичности и экономической эффективности. Геополимерные бетоны, фибробетоны, легкие бетоны, композитные материалы на основе высокопрочных волокон, самовосстанавливающиеся бетоны и аддитивные технологии уже сегодня демонстрируют свой потенциал в различных строительных проектах и продолжают активно исследоваться и совершенствоваться.

Несмотря на некоторые существующие барьеры, такие как необходимость разработки новых нормативных документов, высокая стоимость некоторых материалов и потребность в квалифицированном персонале, дальнейшее развитие исследований, обмен опытом и государственная поддержка будут способствовать более широкому внедрению инновационных материалов в фундаментное строительство. Это позволит создавать более надежные, долговечные, устойчивые и экономически эффективные фундаменты, отвечающие требованиям современного и будущего строительства.

Литература

1. Мангушев Р.А. Проектирование и реконструкция фундаментов на слабых и структурно неустойчивых грунтах / Р.А. Мангушев, А.И. Осокин, Р.А. Усманов. – М. : Издательство АСВ, 2024.
2. Пронозин Я.А. Геотехника Тюмени: наука и инновации / Я.А. Пронозин, А.П. Малышикн, Ю.В. Наумкина. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2024.
3. Соколов Н.С. Технология устройства свайных фундаментов в условиях слабых грунтов. – СПб. : Издательство СПбГАСУ, 2020.
4. Коровяков В.Ф. Инновационные бетоны в строительстве: физико-механические свойства и применение / В.Ф. Коровяков, А.Н. Давидюк // Строительные материалы. – 2018. – № 5. – С. 12–18.
5. Теличенко В.И. Современные технологии в строительстве: экологические и энергоэффективные решения / В.И. Теличенко, В.М. Ройтман. – М. : МГСУ, 2019.
6. Гусев Б.В. Композитная арматура в строительстве: свойства и применение / Б.В. Гусев, В.И. Файнштейн // Журнал строительной физики. – 2021. – № 3. – С. 25–32.

7. Бондаренко В.М. Легкие бетоны в строительстве фундаментов: технологии и перспективы / В.М. Бондаренко, Д.Г. Суворкин // Вестник МГСУ. – 2022. – № 7. – С. 45–53.
8. Лебедев В.М. Самовосстанавливающиеся материалы в строительстве: перспективы применения / В.М. Лебедев, А.Н. Пономарев // Строительство и архитектура. – 2020. – № 4. – С. 19–25.
9. Кузьмин А.В. 3D-печать в строительстве: новые возможности для возведения фундаментов / А.В. Кузьмин, М.А. Степанов // Инженерно-строительный журнал. – 2023. – № 2. – С. 33–40.
10. Фаликман В.Р. Геополимерные бетоны: экологически устойчивая альтернатива традиционным материалам / В.Р. Фаликман, Ю.В. Сорокин // Бетон и железобетон. – 2019. – № 6. – С. 10–16.

References

1. Mangushev R.A. Design and reconstruction of foundations on weak and structurally unstable soils / R.A. Mangushev, A.I. Osokin, R.A. Usmanov. – M. : ASV Publishing House, 2024.
2. Pronozin Ya.A. Geotechnics of Tyumen: science and innovation / Ya.A. Pronozin, A.P. Malyshik, Yu.V. Naumkina. – Tyumen : Tyumen Industrial University, 2024.
3. Sokolov N.S. Technology of pile foundations in soft soils. – SPb. : SPbGASU Publishing House, 2020.
4. Korovyakov V.F. Innovative concretes in construction: physical and mechanical properties and applications / V.F. Korovyakov, A.N. Davidyuk // Construction materials. – 2018. – № 5. – P. 12–18.
5. Telichenko V.I. Modern technologies in construction: environmental and energy efficient solutions / V.I. Telichenko, V.M. Roytman. – M. : MGSU, 2019.
6. Gusev B.V. Composite reinforcement in construction: properties and applications / B.V. Gusev, V.I. Feinstein // Journal of Building Physics. – 2021. – № 3. – P. 25–32.
7. Bondarenko V.M. Lightweight concrete in foundation construction: technologies and prospects / V.M. Bondarenko, D.G. Suvorkin // Bulletin of MGSU. – 2022. – № 7. – P. 45–53.
8. Lebedev V.M. Self-healing materials in construction: application prospects / V.M. Lebedev, A.N. Ponomarev // Construction and architecture. – 2020. – № 4. – P. 19–25.
9. Kuzmin A.V. 3D printing in construction: new opportunities for the construction of foundations / A.V. Kuzmin, M.A. Stepanov // Engineering and construction journal. – 2023. – № 2. – P. 33–40.
10. Falikman V.R. Geopolymer concretes: an environmentally sustainable alternative to traditional materials / V.R. Falikman, Yu.V. Sorokin // Concrete and reinforced concrete. – 2019. – № 6. – P. 10–16.