

Влияние текстильно-армированного бетона на напряжённопдеформированное состояние консольных элементов высотных зданий

Н.О. Борисов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Аннотация: Проведено сравнительное исследование влияния применения высокопрочных и дисперсно-армированных бетонов на напряжённопдеформированное состояние и экономику конструкций высотного здания. Целью работы был выбор оптимальных решений для несущих колонн и консольных элементов. На основе модели бизнес-центра высотой 104,0 м в программном комплексе ЛИРА-САПР выполнены расчёты для бетонов классов В40, В80, сталефибробетона (на основе В40) и нового материала – текстильно-армированного бетона (ТАБ). Для ТАБ были определены повышенные прочностные характеристики. Установлено, что использование сталефибробетона для колонн позволяет снизить их сечение, а требуемая площадь стержневой арматуры сокращается на 30–60% по сравнению с обычным бетоном. При этом для малых сечений (400×400 мм) применение высокопрочного бетона В80 лимитировано нормой по предельному проценту армирования. Расчёт консольных плит показал, что применение ТАБ толщиной 80 мм вместо традиционного железобетона толщиной 120 мм приводит к снижению прогиба на 35% и обеспечивает множественное мелкое трещинообразование. Экономический анализ выявил, что стоимость 1 погонного метра колонны из сталефибробетона сечением 400×400 мм на 20,6–26,9% ниже аналогов из В80 и В40. Стоимость 1 м² консольной плиты из ТАБ на 14% ниже базового варианта. Результаты подтверждают высокую эффективность комбинированного использования фиброармированных бетонов для каркаса и ТАБ для тонкостенных консольных элементов в высотном строительстве.

Ключевые слова: текстильно-армированный бетон, сталефибробетон, высокопрочный бетон, высотное здание, консольные конструкции, колонны, напряжённопдеформированное состояние, ЛИРА-САПР, дисперсное армирование, прочность бетона, трещиностойкость.

1. Введение

Развитие современной строительной отрасли происходит за счет совершенствования технологий и материалов, а также создания новых, что позволяет достичь большей эффективности, снизить стоимость и трудоёмкость технологических процессов. Особенно актуальным становится применение инновационных материалов в элементах, определяющих архитектурную выразительность и функциональность зданий, таких как консольные конструкции (навесы, элементы фасадов). В то же время

вопросы надёжности, долговечности и экономической целесообразности сохраняют свою актуальность.

Стремление соответствовать всем этим требованиям – архитектурным, прочностным и экономическим – часто становится основной сложностью проектирования. Решением данной проблемы может стать применение высокоэффективных композитных материалов, таких как текстильно-армированный бетон (ТАБ). Использование текстильно-армированного бетона (ТАБ) позволяет создавать тонкостенные и облегчённые конструкции, снижая материалоемкость и нагрузку на несущий каркас, при этом свойства бетонной матрицы существенно зависят от состава и характеристик мелкого заполнителя [1]. Показано, что применение модифицированных и переработанных заполнителей в высокоэффективных бетонах влияет на усадочные деформации и способствует повышению долговечности тонкостенных элементов, что особенно важно для конструкций с пониженной толщиной сечений [2]. Установлено, что тип и состав заполнителя определяют прочностные и деформативные характеристики бетона, обеспечивая надёжную работу элементов на изгиб в условиях атмосферных воздействий [3].

Текстильная арматура, в отличие от традиционной стальной, не подвержена коррозии, что позволяет значительно уменьшить защитный слой бетона, а следовательно, и общую толщину конструкции. Это открывает новые возможности для архитекторов и проектировщиков в создании сложных, визуально лёгких форм [4, 5]. При этом производство ТАБ соответствует принципам устойчивого развития, так как может включать в себя использование вторичных ресурсов в качестве заполнителей [6, 7].

Исследования механического поведения ультравысокопрочных бетонов при нормальных и повышенных температурах показали особенности их прочности и огнестойкости, критически важные для расчёта конструкций [8].

Установлены предельные режимы первичного нагрева бетона, при которых происходит наибольшее снижение прочности, что необходимо учитывать при проектировании ответственных элементов [9]. Показано, что предварительное напряжённое состояние бетона существенно влияет на его деформационные и прочностные характеристики при воздействии высоких температур [10]. Практика обследования железобетонных консолей выявила необходимость повышения трещиностойкости и живучести элементов при технологических и эксплуатационных отклонениях [11]. Исследования пористых и облегчённых бетонных композиций продемонстрировали возможности управления плотностью и деформативностью материала без резкого снижения прочности [12].

Экспериментальные работы по дисперсному армированию подтвердили эффективность волокон в повышении несущей способности и трещиностойкости элементов [13]. Показано, что использование вторичных заполнителей в бетоне влияет на его проницаемость и долговечность, что важно для эксплуатации в агрессивных средах [14]. Оптимизация составов бетонных смесей для аддитивных технологий позволила улучшить реологические и прочностные свойства композитов нового поколения [15]. Обследования сборных железобетонных конструкций подтвердили необходимость применения улучшенных бетонных материалов при реконструкции и усилении существующих зданий [16].

Экспериментальные исследования высокопрочных бетонов со стальными и полимерными волокнами подтвердили существенное повышение прочности, трещиностойкости и долговечности материала [17, 18]. Показано, что применение синтетических, минеральных и природных волокон улучшает энергоёмкость разрушения, ударную вязкость и посткритическое поведение бетона, расширяя область его конструктивного применения [19, 20].

Исследования применения стекло- и углепластиковой арматуры показали эффективность непрерывных волокон в повышении несущей способности и долговечности бетонных элементов за счёт направленного армирования [21, 22]. Экспериментальные и реализованные проекты с применением текстильно-армированного бетона подтвердили возможность создания исключительно лёгких и тонкостенных конструкций при сохранении высокой прочности и жёсткости элементов [23, 24].

Целью данного исследования является определение оптимальных параметров несущих и консольных элементов высотного здания, отвечающих архитектурным, конструктивным и экономическим требованиям, с применением текстильно-армированного бетона.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- рассчитать прочностные и деформативные характеристики текстильно-армированного бетона на основе класса В40;
- выполнить расчёт модели высотного здания в программном комплексе ЛИРА-САПР с использованием бетона классов В40, В80 и текстильно-армированного бетона;
- сравнить результаты армирования колонн и консольных плит из различных материалов;
- проанализировать конструктивные ограничения, влияющие на выбор оптимальных параметров;
- предложить альтернативное проектное решение с применением ТАБ для консольных элементов и оценить его экономическую эффективность.

2. Методы

2.1. Описание объекта и проектные решения

Исследование выполнено на основе модели высотного здания [25]. Здание многоэтажного бизнес-центра высотой 104,0 м включает 25 надземных и 2 подземных этажа-стоянки и относится к категории уникальных (Рис. 1).

Конструктивная схема здания – железобетонный каркас. Основные вертикальные несущие конструкции – монолитные железобетонные колонны сечением 600×600 мм с шагом 6 м. В здании запроектировано ядро жесткости (лестнично-лифтовой узел). Перекрытия – монолитные железобетонные, толщиной 200 мм. Стены лестничных клеток – железобетонные, 200 мм.

Помимо основных несущих конструкций, в расчётной модели отдельно рассматривались консольные элементы фасада. В качестве типового представительного элемента была принята консольная плита навеса пролётом 2,5 м для сравнения ее работы при использовании различных материалов.

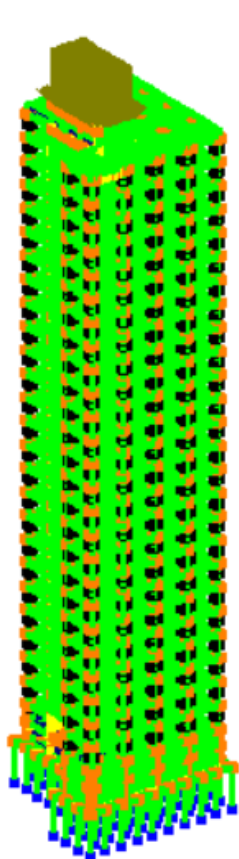


Рис. 1. – Расчётная
модель

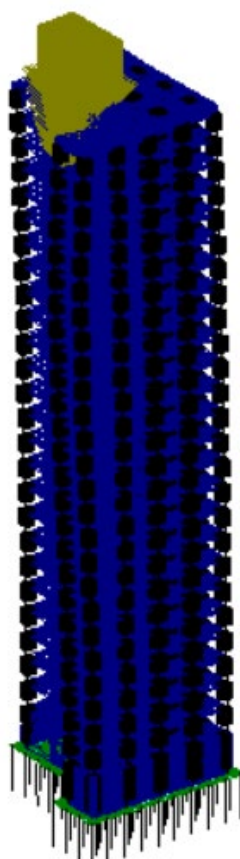


Рис. 2. – Мозаика
вертикальных
напряжений

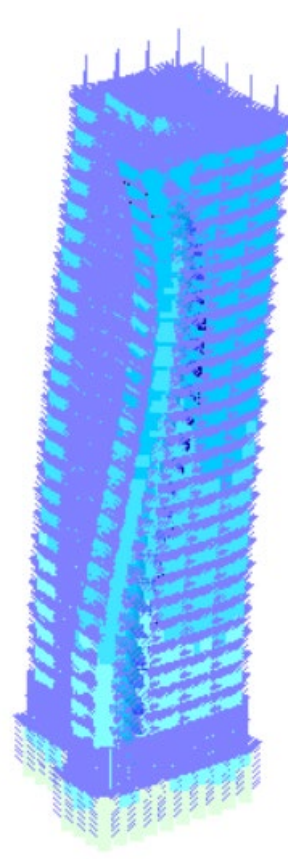


Рис. 3. – Мозаика
вертикальных
перемещений

Исходный вариант – консольная плита из тяжелого бетона класса В40, толщиной 120 мм, с традиционным стержневым армированием класса А500.

Сравниваемые варианты:

1. консольная плита из высокопрочного бетона класса В80, толщиной 100 мм.
2. консольная плита из текстильно-армированного бетона (ТАБ) на основе матрицы В40, толщиной 80 мм, армированная сетками из щелочестойкого стекловолокна.

Материалы колонн, стен, перекрытий в основной модели – бетон класса В40, арматура класса А500 по СП 63. Фундамент – монолитная железобетонная плита толщиной 1000 мм из бетона В80.

2.2. Методика расчёта

Расчёт выполнен в программном комплексе ЛИРА-САПР. Для здания в целом была сформирована пространственная конечно-элементная модель на жестком основании, максимально приближенная к конструктивному решению. Расчётная модель и визуализация расчётов представлены на Рис. 2, Рис. 3.

Консольные плиты моделировались отдельно как плоские балочные элементы, жестко заделанные в месте примыкания к фасадной колонне или диафрагме жесткости. К консолям прикладывалась нагрузка в соответствии с нормативами.

Основная комбинация нагрузок для статического расчёта включала:

1. постоянные нагрузки: собственный вес конструкций, вес полов, перегородок, вес наружного остекления на консолях.
2. временные длительные нагрузки: длительная часть полезной нагрузки на перекрытиях и консолях.
3. временные кратковременные нагрузки: кратковременная часть полезной нагрузки и снеговая нагрузка (для покрытий и возможного снегового мешка на консолях).

Для консольных плит дополнительно учитывалась ветровая нагрузка (как понижающая, так и повышающая).

Сбор основных нормативных и расчётных нагрузок (постоянных, полезных, снеговых, ветровых) выполнен по СП 20. Например, полезная нагрузка на консоли (балконы) принималась нормативной величиной 4,0 кПа с коэффициентом надёжности 1,2.

2.3. Расчётные характеристики материалов

Для выполнения сравнительного анализа были заданы следующие характеристики материалов в ЛИРА-САПР:

- бетон класса В40 и В80 приняты по СП 63 (исходные модули упругости, расчётные сопротивления сжатию и растяжению). Данные приведены в оригинальном тексте.
- текстильно-армированный бетон (ТАБ), расчётные характеристики определены на основе класса матрицы В40 с учетом упрочняющего эффекта текстильной арматуры. Для определения прочности на растяжение при изгибе и модуля упругости ТАБ использовались данные экспериментальных исследований для композитов со щелочестойкой стеклосеткой [26]. В расчётной модели свойства материала были введены как для ортотропного (анизотропного) материала с повышенными характеристиками сопротивления растяжению в направлениях армирования. Для ТАБ учтена арматура из щелочестойкого стекловолокна. В модели ее работа была учтена через задание эквивалентных свойств бетонного композита.

3. Результаты

Расчётная модель бизнес-центра, созданная в параметрической системе САПФИР вместе с нагрузками, была передана в программный комплекс ЛИРА-САПР. Для каждого варианта были последовательно заданы жесткости: типы конечных элементов и материалы.

3.1. Результаты по колоннам

Сравнение проводилось с базовым вариантом (бетон класса В40, сечение колонн 600×600 мм). Последовательно задавались сечения колонн 400×400 мм и 500×500 мм. Каждое сечение проверялось для бетона класса В80 и для бетона класса В40, армированного стальной фиброй.

Максимальные перемещения и деформации для всех рассмотренных вариантов не превысили допустимых значений.

При расчёте определялась максимальная требуемая площадь арматуры вертикальных стержневых элементов – колонн. Данные по площади арматуры для колонн разного сечения представлены в Табл. 1.

Таблица 1.

Значения требуемой площади арматуры для сечений колонн при использовании различных бетонов

Класс бетона по СП 63	Площадь арматуры, см ² , для сечения колонн, мм		
	400×400	500×500	600×600
B40	–	–	76,97
B80	122,00	67,54	49,30
B40 + стальная фибра	41,77	33,17	32,76

Из данных таблицы видно, что применение высокопрочного бетона и фиброармированного бетона позволяет снизить требуемое количество стержневой арматуры. При этом для сечения 400×400 мм из бетона B40 требуемая площадь арматуры (122 см²) превышает конструктивный максимум (предельный процент армирования $\mu=3\%$), что делает данный вариант нереализуемым. В варианте с фиброй рост требуемой арматуры при уменьшении сечения носит более плавный характер.

3.2. Результаты по консольным элементам (навесам)

Для консольной плиты пролётом 2,5 м были получены следующие ключевые результаты, сведенные в Табл. 2.

Таблица 2.

Сравнение параметров консольных плит из различных материалов

Параметр	Бетон В40, h=120 мм	Бетон В40, h=100 мм	ТАБ на основе В40, h=80 мм
Требуемая площадь арматуры, см ² /м	10,15	7,22	—
Расчётный прогиб, мм	18,5	15,8	12,1
Относительный прогиб (L/...)	L/135	L/158	L/207
Трещинообразование	Единичное	Единичное	Множественное мелкое (ширина < 0,1 мм)

Анализ результатов по консолям:

- плита из ТАБ толщиной 80 мм показала наименьший абсолютный прогиб (12,1 мм), что составляет всего 65% от прогиба базовой плиты. Относительный прогиб L/207 значительно строже нормируемого предела L/150.
- моделирование подтвердило характерное для ТАБ псевдопластичное поведение. Вместо образования одной-двух магистральных трещин наблюдается множественное мелкое трещинообразование с самопроизвольным их замыканием при снижении нагрузки, что повышает долговечность конструкции.
- для варианта ТАБ не определяется площадь стержневой арматуры, так как несущая способность обеспечивается текстильными сетками, интегрированными в материал. Это исключает этап отдельного армирования и риск коррозии.

3.3. Сравнительный экономический анализ

Экономический эффект оценивался для двух типов элементов: для 1 погонного метра колонны и для 1 квадратного метра консольной плиты. Расчёт стоимости бетона и арматуры выполнен на основе среднерыночных

цен в Санкт-Петербурге. Для ТАБ учтена повышенная стоимость бетонной матрицы с дисперсным армированием и текстильных сеток.

Наиболее эффективные варианты по стоимости 1 п.м. колонны:

1. В40 + фибра, сечение 400×400 мм: 2728,43 руб.
2. В80, сечение 600×600 мм: 3435,49 руб.
3. В40, сечение 600×600 мм: 3734,87 руб.

Экономический эффект от применения фиброармированного бетона для колонн составил по сравнению с В80: $\delta_1 \approx 20,6\%$, по сравнению с В40: $\delta_2 \approx 26,9\%$

Результаты расчёта стоимости 1 м² консольной плиты представлены в Табл. 3.

Таблица 3.

Сравнительная стоимость 1 м² консольной плиты

Вариант консольной плиты	Стоимость материалов, руб./м ²	Относительная стоимость, % (В40 = 100%)
В40, h=120 мм	3 850	100%
В80, h=100 мм	3 650	95%
ТАБ (В40+сетка), h=80 мм	3 320	86%

Несмотря на относительно высокую удельную стоимость текстильной арматуры, применение ТАБ для консольных элементов позволяет получить суммарную экономию в 14% по сравнению с базовым решением за счет:

- снижения расхода бетона на 33% (по объему);
- отказа от традиционной арматуры, антикоррозионной защиты и связанных с ней работ;
- снижения нагрузки на несущие конструкции.

4. Выводы

В ходе исследования была выполнена сравнительная оценка влияния применения высокопрочных бетонов и инновационного материала — текстильно-армированного бетона (ТАБ) на напряжённо-деформированное состояние и технико-экономические показатели несущих и ограждающих конструкций высотного здания.

На основе анализа существующих исследований для бетонной матрицы класса В40, армированной щелочестойкой стеклосеткой, были обоснованы и применены в расчётной модели ЛИРА-САПР повышенные характеристики сопротивления растяжению и модуля упругости. Это позволило корректно смоделировать работу материала в составе общей расчётной схемы здания и при локальном расчёте консолей.

Расчёт пространственной модели бизнес-центра в ЛИРА-САПР подтвердил выполнение всех нормируемых условий по предельным состояниям для всех вариантов (В40, В80, В40+фибра, ТАБ). Для консольных элементов впервые в рамках единого проекта проведено прямое сравнение работы традиционной железобетонной плиты, плиты из высокопрочного бетона и плиты из ТАБ.

Использование как высокопрочного бетона В80, так и сталефибробетона на основе В40 позволило существенно снизить требуемую площадь продольной стержневой арматуры по сравнению с обычным бетоном В40. Однако для малых сечений (400×400 мм) применение бетона В80 оказывается невозможным из-за превышения конструктивного предела армирования (>3%).

Плита из ТАБ толщиной 80 мм показала наилучшие деформативные характеристики. Ее расчётный прогиб оказался на 35% меньше, чем у базовой плиты из В40 толщиной 120 мм. Ключевым отличием является

принцип армирования, при котором ТАБ исключает применение отдельной стержневой арматуры, заменяя ее интегрированными текстильными сетками.

Для колонн оптимальным с экономической точки зрения признан вариант с применением сталефибробетона и уменьшением сечения до 400×400 мм. Основным ограничением для высокопрочного бетона является недопустимо высокий процент армирования в малых сечениях. Для консолей главным ограничением применения ТАБ выступает требование к огнестойкости, требующее дополнительных конструктивных мер (специальные покрытия, утолщение защитного слоя).

В качестве альтернативы базовому проекту для колонн предложено использование сталефибробетона класса В40 с уменьшением сечения, что дает экономию 20,6–26,9% на 1 п.м. конструкции. Для консольных элементов (навесов) предложено применение ТАБ. Это решение обеспечивает комплексный эффект. Уменьшение толщины элемента на 33% позволяет создавать более лёгкие и эстетичные формы. Повышенная трещиностойкость и отсутствие коррозии арматуры увеличивают долговечность. Снижение материалоемкости и трудоёмкости приводит к удешевлению 1 м² конструкции на 14%.

Таким образом, проведенное исследование показывает перспективность комбинированного использования фиброармированных бетонов и ТАБ в высотном строительстве. Для несущего каркаса (колонны) наиболее эффективно применение сталефибробетона, позволяющего уменьшить сечение при соблюдении конструктивных ограничений. Для ненесущих и слабонагруженных элементов, работающих на изгиб (консоли, навесные панели), оптимальным материалом является ТАБ, обеспечивающий архитектурные, эксплуатационные и экономические преимущества. Дальнейшее внедрение данных материалов требует учета технологических особенностей их производства и монтажа.

Литература

1. Silva, N., Andersson, L.: Influence of fine recycled concrete aggregates in the design and properties of UHPC. B: Proceedings of the fib Symposium 2019: Concrete - Innovations in Materials, Design and Structures 2019. pp. 165–172.
2. Gonzalez-Corominas, A., Etxeberria, M.: Effects of using recycled concrete aggregates on the shrinkage of high performance concrete. Constr. Build. Mater. 2016. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.031.
3. Tazky, M., Osuska, L., Bodnarova, L.: Influence of type and composition of aggregate on mechanical parameters of concrete. B: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019. C. 012048. doi.org/10.1088/1757-899X/549/1/012048.
4. Salesa, Á., Pérez-Benedicto, J.A., Colorado-Aranguren, D., López-Julián, C.L., Esteban, L.M., Sanz-Baldúz, L.J., Sáez-Hostaled, J.L., Ramis, J., Olivares, D.: Physico – mechanical properties of multi – recycled concrete from precast concrete industry 2017. doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.058.
5. Marinković, S., Dragaš, J., Ignjatović, I., Tošić, N.: Environmental assessment of green concretes for structural use. J. Clean. Prod. 2017. doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.015.
6. Caetano, H., Ferreira, G., Rodrigues, J.P.C., Pimienta, P.: Effect of the high temperatures on the microstructure and compressive strength of high strength fibre concretes. Constr. Build. Mater 2019. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.074.
7. Pineaud, A., Pimienta, P., Rémond, S., Carré, H.: Mechanical properties of high performance self-compacting concretes at room and high temperature. Constr. Build. Mater. 2016. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.132.
8. Xiong, M.X., Liew, J.Y.R. Mechanical behaviour of ultra-high strength concrete at elevated temperatures and fire resistance of ultra-high strength concrete filled steel tubes. Mater. Des. 2016. doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.050.

9. Korsun, V.I., Korsun, A., Mashtaler, S.: Determination of the Critical Duration of the First Heating of Heavy Concrete by the Criterion of the Maximum Strength Reduction. Appl. Mech. Mater. 2015. doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.725-726.566.
 10. Korsun, V.I., Korsun, A.: The Influence of Precompression on Strength and Strain Properties of Concrete under the Effect of Elevated Temperatures. Appl. Mech. Mater. 2015. doi.org/10.4028/scientific.net/amm.725-726.469.
 11. Иодчик А.А., Чебровский А.А. К вопросу обследования консолей сборных железобетонных колонн при ошибках изготовления // Инженерный вестник Дона, 2024. №8. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2024/9382.
 12. Jiang, J., Lu, Z., Niu, Y., Li, J., Zhang, Y.: Study on the preparation and properties of high-porosity foamed concretes based on ordinary Portland cement. Mater. Des. 2016. doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.068.
 13. Kleshchevnikova V., Strelets K., Belyaeva S. [et al.] Dispersed reinforcement of columns of a high-rise building. E3S Web of Conferences: Key Trends in Transportation Innovation, KTTI 2019, Khabarovsk, T. 157. Khabarovsk: EDP Sciences, 2020. C. 06029. doi 10.1051/e3sconf/202015706029.
 14. Zaetang, Y., Sata, V., Wongs, A., Chindaprasirt, P. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. Constr. Build. Mater. 2016. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.060.
 15. Kleshchevnikova V., Belyaeva S., Baranov A.: Optimization of Mix Designs and Experimental Study of the Properties of Concrete Mix for 3D Printing. Proceedings of EECE 2020: Energy, Environmental and Construction Engineering, St. Petersburg, Russia, Cham: Springer, 2021. C. 151-160. doi 10.1007/978-3-030-72404-7_16.
-

16. Касымов К.С., Кубасов А.Ю. Обследование технического состояния сборных железобетонных колонн здания АБК хлопчатобумажного комбината в г.Шахты, Инженерный вестник Дона, 2019. №1. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5692.
17. Afroughsabet, V., Ozbakkaloglu, T.: Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Constr. Build. Mater.* 2015. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051.
18. Hannawi, K., Bian, H., Prince-Agbodjan, W., Raghavan, B.: Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes. *Compos. Part B Eng.* 2016. doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.059.
19. Kesikidou, F., Stefanidou, M. J. *Build. Eng.* 25, 2019. p. 100786. doi.org/10.1016/j.job.2019.100786.
20. Klyuev, S. V., Khezhev, T.A., Pukharensko, Y. V., Klyuev, A. V. *Materials Science Forum.* 2018 pp. 125–130. doi.org/10.4028/scientific.net/MSF.945.125.
21. Avdeeva, A., Shlykova, I., Antonova, M., Barabanschikov, Y., Belyaeva, S. Reinforcement of concrete structures by fiberglass rods. B: *MATEC Web of Conferences* 2016. doi.org/10.1051/mateconf/20165301006.
22. Spelter, A., Bergmann, S., Bielak, J., Hegger, J. *Appl. Sci.* 1922–1932 2019. doi.org/10.3390/app9081651.
23. Larisa, U., Solbon, L., Sergei, B.: Fiber-reinforced Concrete with Mineral Fibers and Nanosilica. B: *Procedia Engineering.* 2017 Cc. 147–154. doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.537.
24. Rempel, S., Kulas, C., Will, N., Bielak, J.: Extremely light and slender precast pedestrian-bridge made out of textile-reinforced concrete TRC. B: *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet - Proceedings of the*

2017 fib Symposium. pp. 2530–2537 2017. doi.org/10.1007/978-3-319-59471-2_288.

25. Borisov, N., Mashtaler, S., Korsun, V.: High-Performance Concrete in the Supporting Structures of High-Rise Buildings and Constructions. B: Lecture Notes in Civil Engineering 2020. doi.org/10.1007/978-3-030-42351-3_55.

26. Борисов Н. О., Столяров О. Н. Преимущества применения текстильно-армированного бетона в конструкциях консольного типа. Архитектура, строительство, транспорт. 2025; 5(1), С. 81-92. doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-81-92.

References

1. Silva, N., Andersson, L. Proceedings of the fib Symposium 2019: Concrete - Innovations in Materials, Design and Structures. Pp. 165–172 2019.

2. Gonzalez-Corominas, A., Etxeberria, M. Constr. Build. Mater. 2016. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.031.

3. Tazky, M., Osuska, L., Bodnarova, L. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019 P. 012048. doi.org/10.1088/1757-899X/549/1/012048.

4. Salesa, Á., Pérez-Benedicto, J.A., Colorado-Aranguren, D., López-Julián, P.L., Esteban, L.M., Sanz-Baldúz, L.J., Sáez-Hostaled, J.L., Ramis, J., Olivares, D. Physico – mechanical properties of multi – recycled concrete from precast concrete industry, 2017. doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.058.

5. Marinković, S., Dragaš, J., Ignjatović, I., Tošić, N. Environmental assessment of green concretes for structural use. J. Clean. Prod. 2017. doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.015.

6. Caetano, H., Ferreira, G., Rodrigues, J.P.C., Pimienta, P. Constr. Build. Mater. 2019. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.074.

7. Pineaud, A., Pimienta, P., Rémond, S., Carré, H. Constr. Build. Mater. 2016. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.132.

-
8. Xiong, M.X., Liew, J.Y.R. Mater. Des. 2016. doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.050.
 9. Korsun, V.I., Korsun, A., Mashtaler, S. Appl. Mech. Mater. 2015. doi.org/10.4028/scientific.net/amm.725-726.566.
 10. Korsun, V.I., Korsun, A. Appl. Mech. Mater. 2015. doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.725-726.469.
 11. Iodchik A.A., Chebrovskij A.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, № 8. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2024/9382.
 12. Jiang, J., Lu, Z., Niu, Y., Li, J., Zhang, Y.: Study on the preparation and properties of high-porosity foamed concretes based on ordinary Portland cement. Mater. Des. 2016. doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.068.
 13. Kleshchevnikova V., Strelets K., Belyaeva S. [et al.] E3S Web of Conferences: Key Trends in Transportation Innovation, KTTI 2019, Khabarovsk, Vol. 157. Khabarovsk: EDP Sciences, 2020. P. 06029. doi 10.1051/e3sconf/202015706029.
 14. Zaetang, Y., Sata, V., Wongsas, A., Chindaprasirt, P. Constr. Build. Mater. 2016. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.060.
 15. Kleshchevnikova V., Belyaeva S., Baranov A. Proceedings of EECE 2020: Energy, Environmental and Construction Engineering, St. Petersburg, Russia, Cham: Springer, 2021. Pp. 151-160. doi 10.1007/978-3-030-72404-7_16.
 16. Kasymov K.S., Kubasov A. Ju. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №1. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5692.
 17. Afroughsabet, V., Ozbakkaloglu, T. Constr. Build. Mater. 2015. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051.
 18. Hannawi, K., Bian, H., Prince-Agbodjan, W., Raghavan, B. Compos. Part B Eng. 2016. doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.059.
 19. Kesikidou, F., Stefanidou, M. J. Build. Eng. 25, 100786. 2019. doi.org/10.1016/j.job.2019.100786.
-

20. Klyuev, S. V., Khezhev, T.A., Pukharenko, Y. V., Klyuev, A. V.: Materials Science Forum. 2018 Pp. 125–130. doi.org/10.4028/scientific.net/MSF.945.125.
21. Avdeeva, A., Shlykova, I., Antonova, M., Barabanschikov, Y., Belyaeva, S. MATEC Web of Conferences 2016. doi.org/10.1051/mateconf/20165301006.
22. Spelter, A., Bergmann, S., Bielak, J., Hegger, J. Appl. Sci. 1922–1932 2019. doi.org/10.3390/app9081651.
23. Larisa, U., Solbon, L., Sergei, B. Procedia Engineering. 2017 Pp. 147–154. doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.537.
24. Rempel, S., Kulas, C., Will, N., Bielak, J. High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet - Proceedings of the 2017 fib Symposium. 2017 Pp. 2530–2537. doi.org/10.1007/978-3-319-59471-2_288.
25. Borisov, N., Mashtaler, S., Korsun, V. Lecture Notes in Civil Engineering 2020. doi.org/10.1007/978-3-030-42351-3_55.
26. Borisov N. O., Stolyarov O. N. Arkhitektura, stroitel'stvo, transport. 2025; 5(1), Pp. 81–92. doi.org/10.31660/2782232X-2025-1-81-92.

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 12.12.2025

Дата публикации: 7.02.2026