

Обзорная статья

УДК 624.1

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-276-287>

CC BY 4.0

Об эффективности применения конструкций из фибробетона в подземном строительстве. Опыт и перспективы

Владимир Евгеньевич Русанов¹ , Павел Сергеевич Маслов² , Вячеслав Александрович Алексеев^{3*} 

¹ ООО «НИЦ «Тоннельной ассоциации», Москва, Россия

² ОАО «Северсталь-метиз», Череповец, Вологодская область, Россия

³ НОЦ «Подземное строительство», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: 634586@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассматривается актуальное состояние возможностей повышения эффективности строительных процессов с помощью применения фибробетонов при строительстве транспортных и коммунальных тоннелей, а также других ответственных сооружений. Авторами представлен зарубежный опыт широкого применения фибробетонов в транспортном строительстве, также приводятся малочисленные случаи применения фибробетонов в отечественной практике, отмечается несоответствие отечественного опыта современному уровню техники. Приводятся основные блокираторы развития рассматриваемого вопроса, проблематика теоретического подхода и практического применения. **Материалы и методы.** Изложены принципиальные аспекты современного подхода к определению показателей качества фибробетонов и принципы классификации фибробетонов по качественному признаку, положенные в основу нормирования характеристик материала. Показана преемственность отечественных и европейских нормативных документов. **Результаты.** Описываются иллюстрированные примеры возможностей оптимизационного подхода к выбору конструктивных решений при проектировании транспортных сооружений, применяющиеся в зарубежной практике. **Заключение.** Показана аргументация в пользу развития технологии, открывающая возможности для значительного сокращения затрат, обоснованных научным подходом. В заключение авторы приводят рекомендации по основным направлениям практического развития перспективного использования материала в отечественной практике.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фибробетон, дисперсно-армированные бетоны, композиционные материалы, высокопрочный бетон, методы расчёта, напряженно-деформированное состояние, фибра, модифицированные вяжущие, тоннель, обделка, несущие конструкции подземных сооружений.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Русанов В.Е., Маслов П.С., Алексеев В.А. Об эффективности применения конструкций из фибробетона в подземном строительстве. Опыт и перспективы // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 3. С. 276–287. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-16-3-276-287>. – EDN. FAEQWR.

ВВЕДЕНИЕ

Современное строительство постоянно совершенствуется, оптимизируются материалы и их свойства, используются более современные технологии, фундаментальный анализ позволяет применять более прогрессивные методы расчетов конструкций. Одним из векторов развития в совокупности с последними достижениями науки

и техники является более широкое применение композиционных материалов, например, таких, как фибробетоны [0, 12, 13]. Подобные материалы представляют собой особый тип бетона, в объеме которого методом дисперсного армирования [4, 5] могут распределяться металлические или полимерные волокна разной геометрии и характеристик [6, 7], т.е. вся толща бетонной конструкции при строительстве будет пронизана волокнами, распо-

© Русанов В.Е., Маслов П.С., Алексеев В.А., 2024

лагающимися в разных направлениях и задающих особые свойства материала.

В настоящее время в фибробетонах применяется большое количество разных видов фибр, номенклатура которых постоянно расширяется, свойства уже известных фиброволокон оптимизируются [8]. К основным материалам для фибры, используемой в дисперсном армировании бетонов, относятся сталь, стекло, полимеры (акрил, арамид, нейлон, полипропилен и др.), керамика, асбест, углерод и даже природные волокна (дерево, кокосовый орех, бамбук и др.) [9].

Однако в конструкционных бетонах, которые воспринимают основную нагрузку в зданиях и сооружениях, используется чаще всего стальная фибра, хотя ведутся исследования по использованию полимерных фиброволокон с характеристиками, близкими к стальной [2, 8, 10]. Конструкционная фибра должна обладать повышенной прочностью к нагрузкам, не иметь усадочных деформаций и способствовать повышенной трещиностойкости и износостойкости.

С точки зрения свойств для бетонов наиболее распространенных классов В20–В40 фибробетон является эффективной заменой стандартному железобетону и позволяет добиваться требуемых физико-механических свойств бетонных конструкций, при этом придавая ряд положительных свойств:

- исключение арматурных работ и снижение затрат на строительство;
- снижение усадки;
- устойчивость к трещинообразованию;
- высокую прочность на разрыв и растяжение, сравнимую с армированным железобетоном;
- повышенный модуль упругости;
- устойчивость к атмосферным воздействиям и химическим веществам;
- высокую пластичность;
- ударопрочность.

Особенно перспективно выглядит использование фибробетона в подземных конструкциях в качестве несущих элементов сборных и монолитных конструкций, набрызгбетонируемых оболочек.

Также следует отметить, что на свойства конечного материала – фибробетона – значительно влияют характеристики используемого вяжущего вещества и наполнителей. Авторами на базе кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов НИУ МГСУ проводились испытания по модификации вяжущего для фибробетонов наполнителями, имеющими самостоятельную гидравлическую активность и высокую степень дисперсности (микрочастицы подобранных минеральных компонентов с диаметрами частиц $d_{95} = 6$ и 9 мкм с содержанием наночастиц, имеющих средние диаметры менее $0,1$ мкм до 10 и 5% соответ-

ственно). Внедрение микро- и наночастиц с заданными гранулометрическими параметрами зерен позволяет заполнять межзерновое пространство гранул стандартной фракции портландцемента частицами с размерами, сравнимыми с объемом образованных пор, а также способствующих уплотнению капиллярных пор. При подборе состава композиционного вяжущего также должно учитываться максимальное заполнение межзернового пространства микронаполнителем в заданном объеме без его превышения с исключением эффекта расклинивания крупных частиц. Содержащиеся в наполнителе наночастицы, в свою очередь, заполняют самые мелкие поры и способствуют уплотнению структуры цементного теста на микроуровне. При введении в модифицированную бетонную смесь фибры происходит более плотное контактное расположение системы «фибра – цементный камень – зерна инертного заполнителя», способствующее более активному вовлечению работы фибры в работу бетонной конструкции при эксплуатации.

Однако на сегодняшний день отсутствуют однозначные нормативные документы, назначающие расходы материалов для получения ряда требуемых характеристик фибробетона, что особенно важно при сложной работе конструкций, как, например, в обделке подземных сооружений. Опыты подбора составов и некоторые экспериментальные данные не получили продолжения в виде законченного документа, позволяющего проектировать фибробетонные конструкции и назначать для него определенные расходы требуемых компонентов. Одной из целей планируемых научных изысканий является разработка нормативной базы для расчетов и типовых технологических карт с целью получения фибробетона, в частности, для применения в подземных конструкциях.

ООО «НИЦ «Тоннельной ассоциации» и НИЦ «Подземное строительство» НИУ МГСУ проводят научные изыскания по использованию фибробетонов в подземных конструкциях и имеют наработки по расчету и проектированию фибробетонных конструкций, подтвержденные опытом строительства и эксплуатации. Кроме того, следует отметить, что глобальный прогресс, постоянно развивающаяся промышленность, внедрение инноваций химической индустрии позволяют в будущем резко повысить эффективность таких технологий.

ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Тоннельные обделки, сооружаемые закрытым способом (кругового и сводчатого очертания) с позиций строительной механики, являются статически неопределимыми конструктивными системами, ра-

ботающими в подавляющем большинстве случаев в условиях внецентренного сжатия с преобладанием напряжений сжатия. В таких условиях прочностные и деформативные свойства фибробетонов (ФБ) реализуются наиболее эффективно благодаря их особым характеристикам.

Фибробетонные конструкции способны воспринимать нагрузку и сопротивляться деформированию после формирования в них трещин без хрупкого разрушения, при этом предел растяжимости ФБ (предельные относительные деформации растяжения) может превышать предел сжимаемости.

В настоящее время на территории РФ разработаны и действуют нормативные документы, позволяющие проектировать эффективные тоннельные конструкции из ФБ: СП 297¹, СП 360², СТО НОСТРОЙ 2.27.125³, а также нормативно-методические руководства, например, «Руководство по проектированию бетонных и железобетонных тоннельных обделок с использованием композитных материалов», утвержденное стройкомплексом города Москвы. Технические условия и требования к контролю качества тяжелых и мелкозернистых сталефибробетонов опубликованы в ГОСТ Р 59535⁴. Своды правил СП 360 и СП 297 введены в Перечень документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального Закона от 30 декабря 2009 г. N 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

При всех существующих возможностях применение фибробетонов для изготовления несущих конструкций транспортных, коммунальных тоннелей, а также других ответственных сооружений городской инфраструктуры в отечественной практике строительства фибробетон распространено слабо.

АНАЛИЗ ОПЫТА ПРИМЕНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ В РФ

Фибробетон в значительно большей степени применяется в европейских странах, где лидирующие позиции занимают Испания [11, 12, 113], Италия [114, 115, 116, 117], Португалия [118], Великобритания, Германия [119, 20, 21, 22], Норвегия, Швейцария. За пределами Европы фибробетон широко применяется Австралией [23, 24], Брази-

лией, Перу, США [25, 26], Эквадором, Японией. С недавнего времени в Турции распространение получило применение фибробетона в креплении транспортных тоннелей методом торкретирования [27, 28].

Широкое применение обусловлено высоким уровнем научно-технического прогресса в этой теме, произошедшего за последние двадцать лет. Современный уровень техники позволяет получить значительные преимущества при использовании материала. Сопротивление поперечной силе в конструкции повышается до 57% в зависимости от различных параметров, ширина раскрытия трещин при этом уменьшается до 70% при отложенном формировании трещин в зоне действия поперечных сил [29].

По данным бюллетеня Международной Тоннельной Ассоциации за 2016 год [30, 31], с начала внедрения фибробетонов в транспортном тоннелестроении в 1982 году на метрополитене Италии до 2016 года только для щитового способа строительства тоннелей реализовано порядка 40 крупных объектов (см. табл. 1). Применялись конструкции обделок диаметрами от 4,8 до 14,3 м с армированием только стальной фиброй в 58% случаев, с комбинированным армированием «стальная фибра + стальная арматура» в 39% случаев. Один объект был реализован с применением армирования полимерной фиброй в сочетании со стальной арматурой.

Широкая практика применения фибробетонов инициирует также проведение научно-технического обоснования применения выбранных технических решений. В результате выполнения этих работ появляется возможность значительного сокращения затрат, уточнения расчетных методик. Например, при строительстве девятой линии метро в Барселоне принятое на основе расчетной методики *fib Model Code 2010* [32] техническое решение (65 кг фибры на 1 м³ бетона), выглядевшее эффективным, по итогам научной работы [33] было уточнено со снижением количества фибрового армирования до 45 кг/м³.

Например, при строительстве Линии 9 метро в Барселоне, по итогам научной работы, основанной на расчетных методиках *fib Model Code 2010* [32], удалось оптимизировать фибровое армирование блоков тоннельной обделки. Исходное техническое решение предполагало армирование блоков

¹ СП 297.1325800.2017 — Конструкции фибробетонные с неметаллической фиброй. Правила проектирования. М.: Стандартинформ, 2017.

² СП 360.1325800.2017 — Конструкции сталефибробетонные. Правила проектирования. М.: Стандартинформ, 2018.

³ СТО НОСТРОЙ 2.27.125-2013 — Освоение подземного пространства. Конструкции транспортных тоннелей из фибробетона. Правила проектирования и производства работ

⁴ ГОСТ Р 59535-2021 — Бетоны тяжелые и мелкозернистые, дисперсно-армированные стальной фиброй. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2021.

Таблица 1

Зарубежный опыт применения сборных СФБ обделок для транспортных тоннелей [30]

Проект	Год	Страна	Назн.	D _н , м	h, м	Тип ФБ
Metrosud	1982	Италия	М	6.40	0.30	СФБ
Heathrow Express	1994	Англия	ЖД	6.14	0.22	СФБ
Napoli metro	1995	Италия	М	6.40	0.30	СФБ
2nd Heinenoord	1999	Нидерланды	АД	8.30	0.35	СФБ
Jubilee Line Extension	1999	Англия	М	4.90	0.20	СФБ
Essen	2001	Германия	М	8.00	0.35	СФБ
Oënzberg tunnel	2003	Швейцария	ЖД	11.40	0.30	СФБ+С
Oënzberg-TBM	2003	Швейцария	ЖД	12.20	0.40	СФБ+С
Oënzberg-Shield	2003	Швейцария	ЖД	12.20	0.40	СФБ
Barcelona Metro Line 9 - Can Zam Stretch	2003	Испания	М	11.60	0.35	СФБ
Channel Tunnel Rail Link (CTRL)	2004	Англ. - Фр.	ЖД	7.90	0.35	СФБ
Heathrow Express Extension (HexEx)	2005	Англия	ЖД	6.14	0.22	СФБ
Metropolitan Expressway Central Circular Shinjuku Route tunnel	2005	Япония	АД	11.80	0.45	СФБ+С
Barcelona Metro Line 9 - Stretch I	2006	Испания	М	9.04	0.32	СФБ+С
Lötschberg	2007	Швейцария	ЖД	4.94	0.22	СФБ
Beacon Hill Tunnels	2007	США	АД	7.30	0.30	н/д
Madrid Metro	2007	Испания	М	9.00	0.30	СФБ+С
Line 1 of the Valencia Metro	2007	Испания	М	9.20	0.40	СФБ+С
Heathrow - PiccEx	2008	Англия	М	4.80	0.15	СФБ
Heathrow Express Ext. Tunnel to T5	2008	Англия	ЖД	6.14	0.22	СФБ
São Paulo Metro Line 4	2009	Бразилия	М	9.10	0.35	СФБ
Docklands Light Railway (DLR) Extension	2009	Англия	ЖД	5.80	0.25	СФБ
Malaga Rail Tunnel	2009	Испания	ЖД	9.04	0.32	ПФБ+С
The Clem Jones Tunnel - Clem 7	2010	Австралия	АД	12.00	0.40	СФБ+С
Extension of the FGC in Terrassa	2010	Испания	ЖД	6.60	0.30	СФБ+С
Keio line	2010	Япония	ЖД	7.30	0.30	СФБ+С
Metropolitan Expressway	2011	Япония	АД	14.30	0.45	СФБ+С
Airport Link	2012	Австралия	АД	12.20	0.40	СФБ
Sagami Line	2012	Япония	АД	12.80	0.50	СФБ+С
Koishikawa Kasen	2013	Япония	ЖД	7.30	0.30	СФБ+С
The Wehrhahn Line	2014	Германия	М	8.90	0.30	СФБ
San Francisco Central Subway	2014	США	ЖД	5.96	0.28	СФБ+С
Legacy Way	2015	Австралия	АД	12.00	0.35	СФБ
Metropolitan Expressway	2015	Япония	АД	13.10	0.40	СФБ+С
Doha Metro Red North Line	2016	Катар	М	6.77	0.30	СФБ
Downtown Line 3	н.в.	Сингапур	М	6.36	0.28	СФБ
Thomson Line	н.в.	Сингапур	М	6.36	0.28	СФБ
Crossrail	н.в.	Англия	ЖД	6.80	0.30	СФБ
Brenner Base Tunnel	н.в.	Ит. - Австрия	АД	6.00	0.20	СФБ+С

фиброй с дозировкой 65 кг/м³, предложенное оптимизированное решение — армирование фиброй с дозировкой 45 кг/м³.

Обширный опыт зарубежных коллег свидетельствует о технико-экономической эффективности фибробетонов, особенно в тоннелестроительной отрасли, которая достигается за счет:

- сокращения трудозатрат на изготовление сборных обделок щитового способа работ и монолитных обделок горного способа работ;
- повышения производительности (скорости производства при поточном методе) при производстве сборных блоков обделок для щитового способа работ и сокращения времени на изготов-

ление монолитных обделок при горном способе работ;

- снижение процента брака при производстве сборных блоков, а также их транспортировании и монтаже блокоукладчиком.

В отечественном тоннелестроении до настоящего времени нет прецедента применения фибробетонных обделок тоннелей на объектах транспортного и даже коммунального назначения.

Фибробетонные тоннельные конструкции применялись в рамках опытных участков метрополитена в Москве (фибронабрызгбетонная рубашка перегонного тоннеля и замковые блоки из фибробетона) и Санкт-Петербурге (3 кольца обделки) [34, 35, 36, 37], при этом на момент сооружения опытных участков использовалась стальная фибра, которая, по состоянию вопроса на сегодняшний день, не является рациональной для применения в несущих конструкциях, работающих в условиях напряженного состояния внецентренного сжатия.

В то же время примечательно, что первенство в применении ФБ принадлежит Российским инженерам [38]: Владимир Павлович Некрасов в начале 20 века (1907–1909) исследовал и запатентовал состав бетона, армированного отрезками проволоки (монография 1925 года «Метод косвенного вооружения бетона»).

Основными проблемами внедрения ФБ в подземном строительстве и, в частности, для сооружения тоннельных обделок различного назначения являются:

- отсутствие прецедентов использования ФБ конструкций на реальных объектах в условиях РФ, а наличие двух-трех опытных участков, выполненных в 90-е – 2000-е годы, не дает корректной информации о технико-экономической эффективности материала;
- слабая осведомленность проектных организаций и органов государственной экспертизы о возможностях, перспективах и условиях эффективного применения ФБ, а также отсутствие методологических наработок в части проектирования и расчета конструкций из ФБ;
- отсутствие оснащенности ЗЖБК (дозаторы, диспергаторы, специальные смесители), в том числе отсутствие специального оснащения для испытания фибробетонных образцов в лабораториях контроля качества;
- нет накопленной статистики по испытаниям ФБ образцов в условиях РФ для различных классов ФБ, не наработана практическая база конструкций обделок в увязке с классами ФБ;
- нет специализированных курсов (лекций) по ФБ конструкциям подземных сооружений и тоннелей в вузах.

В настоящее время обобщенно конструкционные фибробетоны можно классифицировать:

- по типу бетона-матрицы — из бетона нормальной прочности (до В60); высокопрочного бетона — ВПБ (В60-В100[150]); сверхвысокопрочного бетона — СВПБ (выше В150);
- по типу применяемой фибры — из стальной (проволочной с отгибами $R > 1200$ МПа); полимерной (прямой $R > 800$ МПа); комбинации микрофибры и конструкционной фибры;
- по типу армирования в конструкции — фибра одного типа; комбинация фибры одного типа и стержневого армирования без преднапряжения; фибра двух типов (гибрид) и стержневого армирования без преднапряжения; фибра двух типов (гибрид) и преднапряженная арматура;
- по характеру работы с трещинами — с разупрочнением (обычный ФБ); с упрочнением (большое содержание фибры как в ФБ нормальной прочности, так и в ВПБ или СВПБ).

В связи с особенностями характера работы, нормирование фибробетонов по физико-механическим характеристикам осуществляется двумя классами — классом бетона (бетона-матрицы) по прочности на сжатие B и классом фибробетона по остаточной прочности на растяжение B_r .

Класс фибробетона по остаточной прочности на растяжение B_r определяется по испытаниям образцов-призм сечением 150×150 мм длиной 550...600 мм с надрезом по центру (см. рис. 1) или без надреза либо круглых плит диаметром 800 мм, толщиной 75 мм [39]. В ходе испытаний фиксируются прикладываемая нагрузка и ширина раскрытия надреза (в случае образца-призмы с надрезом) либо прогиб образца по центру (в случае образца-призмы без надреза и круглой плиты).

Особенностью проведения испытаний является использование специального сервогидравлического оборудования для нагружения и контроля за деформациями образцов, обладающего практически мгновенным откликом на изменение жесткости образца вследствие процессов формирования микро- и макротрещин, что позволяет зафиксировать на графиках «Нагрузка — Деформация» нисходящие участки (стадию разупрочнения).

На схеме (рис. 2) приведены результаты испытаний образцов-призм с надрезом, при этом шкала сосредоточенной нагрузки F заменена шкалой нормальных напряжений в центральном сечении образца σ_N , шкала $CMOD$ (Crack Mouth Opening Displacement) обозначает линейные деформации нижней кромки надреза образца (моделирование роста трещины). Прочность, соответствующая малой области деформаций (вторая группа предельных состояний), при $CMOD_1 = 0,5$ мм обозначается на схеме как f_{r1} . Проч-

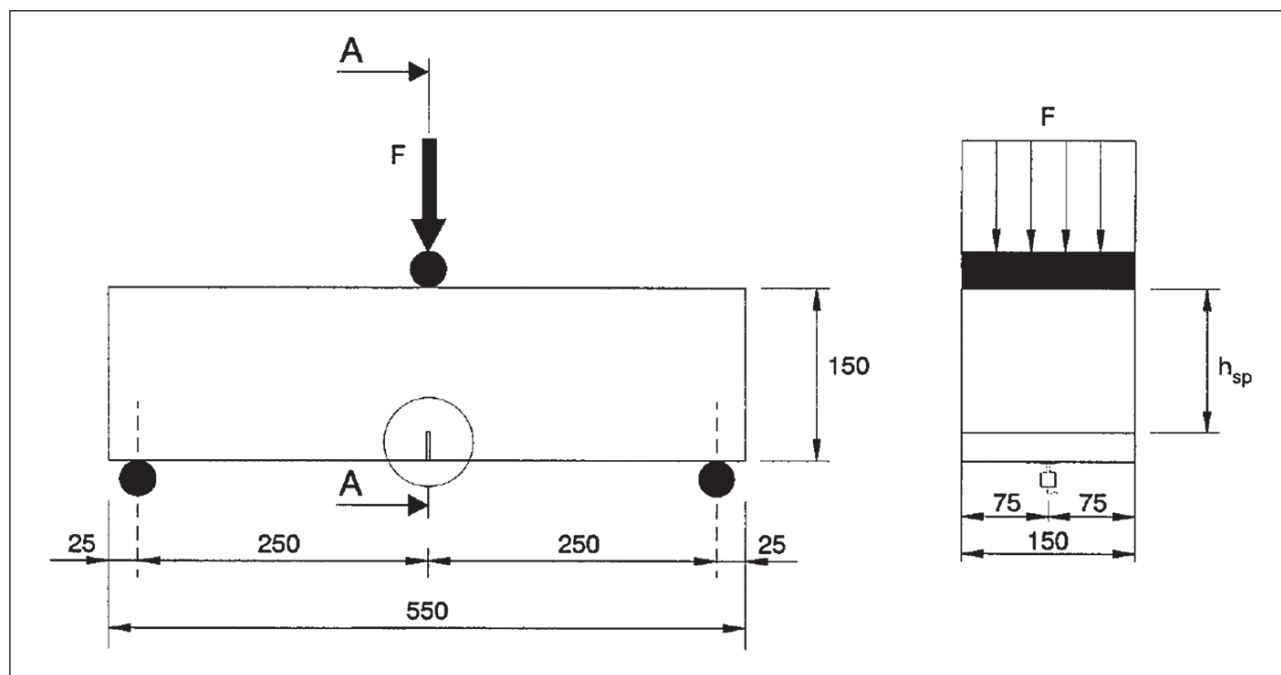


Рис. 1. Пример схемы испытания образца-призмы с надрезом для определения класса фибробетона по остаточной прочности на растяжение B_F

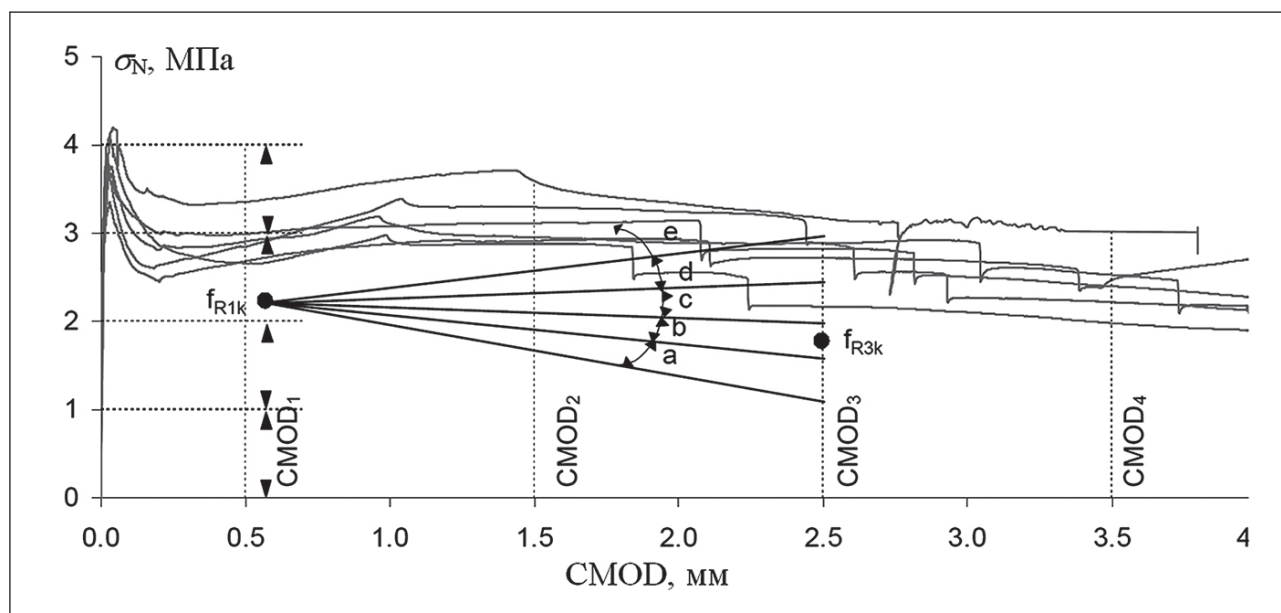


Рис. 2. Схема определения класса фибробетона по остаточной прочности на растяжение B_F на основе результатов испытания образцов-призм с надрезом

ность, соответствующая предельным деформациям (первая группа предельных состояний), при $CMOD_3 = 2,5$ мм обозначается на схеме как f_{R3} . Для нормирования класса фибробетона по остаточной прочности на растяжение B_F используются два показателя: f_{R1} , который записывается в обозначении числом с округлением в меньшую сторону до ближайшего нормиру-

емого класса; соотношение f_{R3}/f_{R1} с ранжированием по диапазонам и обозначением латинскими буквами:

- a – при $0,5 \leq f_{R3}/f_{R1} < 0,7$;
- b – при $0,7 \leq f_{R3}/f_{R1} < 0,9$;
- c – при $0,9 \leq f_{R3}/f_{R1} < 1,1$;
- d – при $1,1 \leq f_{R3}/f_{R1} < 1,3$;
- e – при $1,3 \leq f_{R3}/f_{R1}$.

Табл. 2

Значения нормативных сопротивлений (табл. 5.2.1. СТО НОСТРОЙ 2.27.125-2013)

B_F		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
$R_{F0.5,n}$ и $R_{F0.5,ser}$		0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
$R_{F2.5,n}$ и $R_{F2.5,ser}$	<i>a</i>	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00
	<i>b</i>	0,35	0,70	1,05	1,40	1,75	2,10	2,45	2,80	3,15	3,50	3,85	4,20	4,55	4,90	5,25	5,60
	<i>c</i>	0,45	0,90	1,35	1,80	2,25	2,70	3,15	3,60	4,05	4,50	4,95	5,40	5,85	6,30	6,75	7,20
	<i>d</i>	0,55	1,10	1,65	2,20	2,75	3,30	3,85	4,40	4,95	5,50	6,05	6,60	7,15	7,70	8,25	8,80
	<i>e</i>	0,65	1,30	1,95	2,60	3,25	3,90	4,55	5,20	5,85	6,50	7,15	7,80	8,45	9,10	9,75	10,40
$R_{F0.5}$		0,33	0,67	1,00	1,33	1,67	2,00	2,33	2,67	3,00	3,33	3,67	4,00	4,33	4,67	5,00	5,33
$R_{F2.5}$	<i>a</i>	0,17	0,33	0,50	0,67	0,83	1,00	1,17	1,33	1,50	1,67	1,83	2,00	2,17	2,33	2,50	2,67
	<i>b</i>	0,23	0,47	0,70	0,93	1,17	1,40	1,63	1,87	2,10	2,33	2,57	2,80	3,03	3,27	3,50	3,73
	<i>c</i>	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00	3,30	3,60	3,90	4,20	4,50	4,80
	<i>d</i>	0,37	0,73	1,10	1,47	1,83	2,20	2,57	2,93	3,30	3,67	4,03	4,40	4,77	5,13	5,50	5,87
	<i>e</i>	0,43	0,87	1,30	1,73	2,17	2,60	3,03	3,47	3,90	4,33	4,77	5,20	5,63	6,07	6,50	6,93

ного армирования, исключение конструктивного армирования) [41, 42];

- производство конструкций из высокопрочного и сверхвысокопрочного фибробетона (гибридного фибробетона с применением двух видов фибры – микрофибры и конструкционной фибры) [43, 44];
- производство конструкций, работающих на изгиб (балки, плиты больших пролетов) [42];
- исследования напряженного состояния элементов фибробетонных конструкций, работающих на кручение [45];

- исследования и разработка эффективных анкерующих устройств для стальной проволоочной фибры;
- разработка методов и способов ориентирования фибры в конструкциях с целью повышения эффективности армирования [46];
- разработка новых и совершенствование существующих методов контроля качества ФБ конструкций;
- совершенствование методов испытаний ФБ образцов с целью снижения процента выбраковки, снижения коэффициента вариации, повышения точности измерений [447].

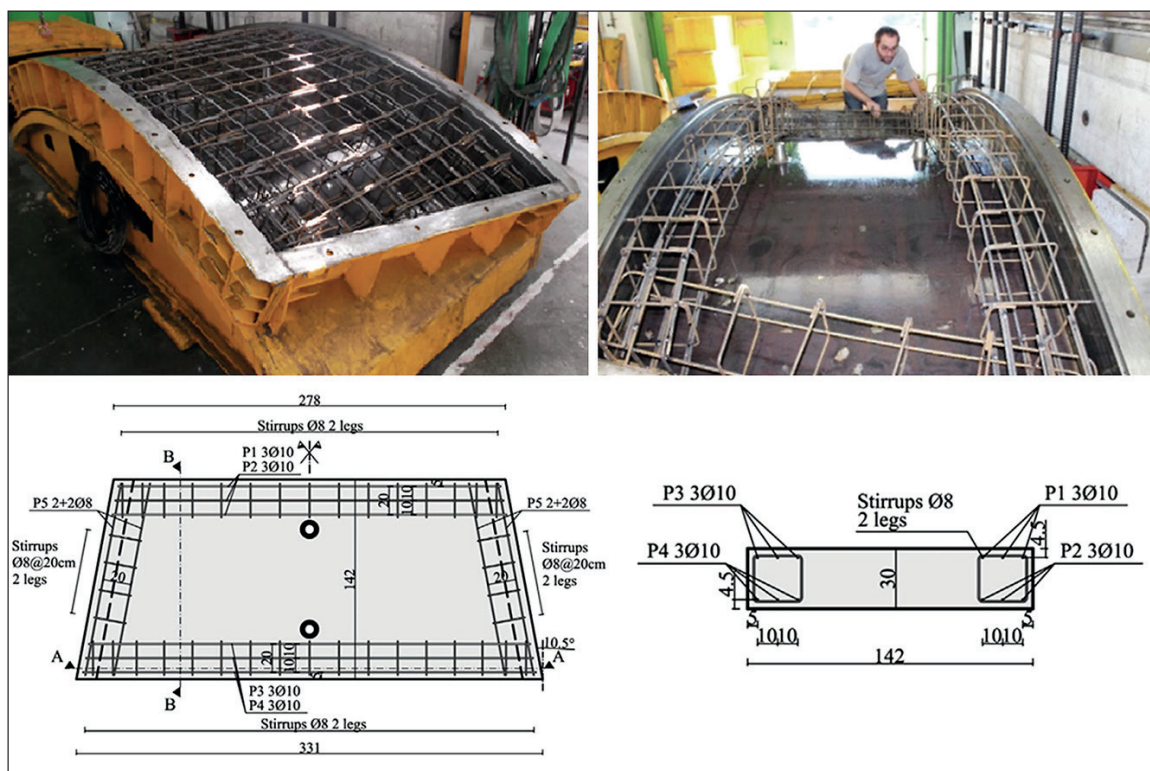


Рис. 5. Опыт «оптимизации» армирования сборной обделки (Испания)

В качестве наглядных примеров реализации результатов исследований в транспортных тоннелях следует отметить опыт испанских [41] и итальянских [42] специалистов по «оптимизации» армирования сборных и монолитных обделок тоннелей (см. рис. 5, 6).

В случае, представленном на рис. 5, — сборная обделка перегонного тоннеля метрополитена в Испании. В базовом варианте традиционного армирования количество стержневого армирования составляло примерно 150 кг/м^3 . Инженерами было предложено решение применить фибробетон на основе бетона класса В45 и стальной проволоочной фибры в количестве 45 кг/м^3 в комбинации со стержневым армированием из неметаллической арматуры, устраиваемым локально — вдоль поперечных/кольцевых и продольных/радиальных граней блоков, для восприятия усилий от щитовых домкратов при проходке

(поперечные/кольцевые грани) и восприятию сжимающих напряжений, формирующихся в блоках от горного давления (продольные/радиальные грани). Предложенное техническое решение позволило исключить применение стальной арматуры с упрощением формы стержневых каркасов и за счет снижения финансовых затрат и трудовых ресурсов при изготовлении армокаркасов достичь экономии при производстве блоков до 12%.

В случае, представленном на рис. 6, — монолитная обделка автодорожного тоннеля в Турине (Италия). Базовый вариант предполагал традиционное армирование обделки отдельными стержнями, что является трудоемким процессом на стадии возведения монолитной обделки. После расчетного обоснования «оптимизированного» армирования было предложено решение по исключению стержневого армирования в своде и стенах тоннеля до зоны концентрации на-

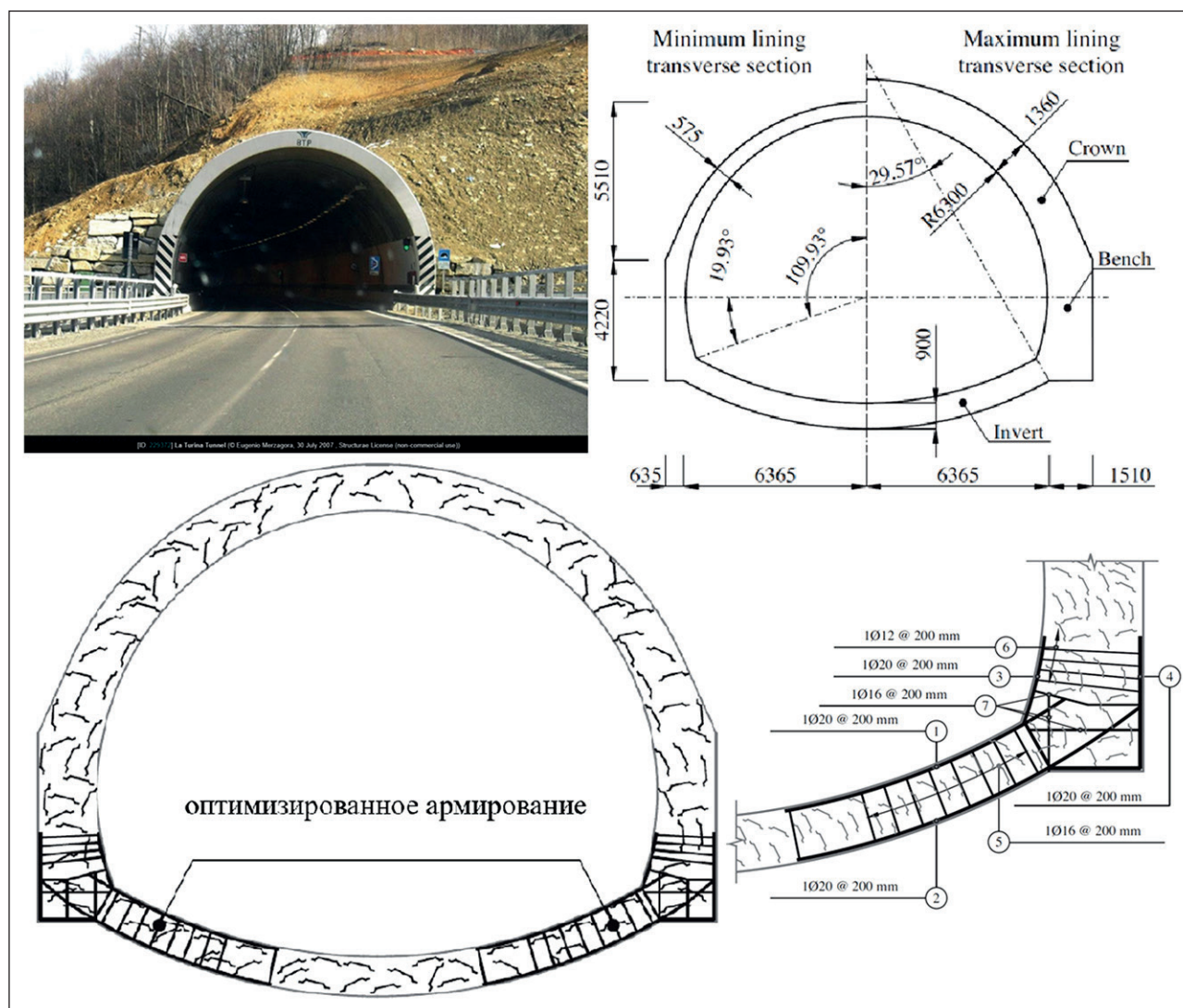


Рис. 6. Опыт «оптимизации» армирования сборной обделки (Италия)

пряжений в углах сопряжения стен с обратным сводом, а также исключение стержневого армирования в средней трети обратного свода отделки.

Оставшееся стержневое армирование в зонах с концентрацией растягивающих напряжений предложено реализовать в виде плоских каркасов, которые возможно заготавливать на строительной площадке и доставлять на монтаж в тоннель на участок армирования с целью максимального сокращения трудозатрат и сроков производства работ.

Достигнутые результаты при реализации данного технического решения: 30% сокращение количества арматуры в целом (суммарно по массе стали — арматура + фибра); 75% сокращение стержневой арматуры; значительное упрощение армирования; исключение наиболее трудоемкого процесса армирования свода; сокращение сроков строительства тоннеля.

ВЫВОДЫ

В качестве основных выводов следует отметить:

- в настоящее время в условиях Российской Федерации нет препятствий к проектированию и про-

изводству ФБ конструкций тоннелей и подземных сооружений;

- производители стальной фибры готовы обеспечить производство достаточным количеством фибры;
- внедрение фибробетонов в российских условиях сдерживается «страхом нового», малым опытом работы с ФБ, неналаженной технологией производства ФБ конструкций и контроля их качества;
- заводам ЖБК необходимо вложение средств на дооснащение специализированным оборудованием для производства ФБ конструкций — автоматические дозаторы, интегрируемые в технологический процесс;
- лабораториям необходимо специальное испытательное оборудование с сервогидравликой для контроля качества;
- при использовании фибробетонных конструкций ожидаемый эффект, в основном, связан с сокращением трудозатрат на изготовление арматурных изделий и достигает: 5...20% для сборных ФБ обделок щитового способа; 10...30% для монолитных ФБ обделок горного способа, а также фибробрызгбетонных крепей и первичных обделок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ige Samuel Ayeni, Jamaludin Mohamad Yatim, Nor Hasanah. A review of hybridised use of fibres in shear behaviour of fibre-reinforced concrete beams. ASEAN Engineering Journal. 2024. <https://doi.org/10.11113/aej.V14.20314>
2. Kotha Hima Bindu, Mudigonda Rathna Chary, Jagadish Shrisaila Haranatti. Behavior of High Strength Reinforced Cement Concrete with Polypropylene and Steel Fibres. MATEC Web of Conferences 392. March 2024. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439201011>
3. R. Lal, Surender Kumar Verma, Chander Sheikhar Singla. Fibre Reinforced Concrete: An Overview. Conference: International Conference on Emerging Trends in Engineering Innovations and Technology Management (ICET: EITM-2017) NIT Hamirpur, India. December 16–18. 2017.
4. Rui Valente, Mário Pimentel. Fibre reinforced concrete under in-plane shear stresses. Engineering Structures. 2024; 307: 117890. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117890>
5. Charankumar Ashok Kamble. Strength properties of hybrid fibre reinforced concrete using fly ash. International journal of scientific research in engineering and management . 2023; 07(09). <https://doi.org/10.55041/IJSREM25834>
6. Yazhini Ezhilarasan, R. Chithra. Performance study of fibre reinforced functionally graded concrete pipes. Construction and Building Materials. 2022; 344(1):128224. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128224>
7. Florence More, Senthil Selvan. Impact of Fibres on the Mechanical and Durable Behaviour of Fibre-Reinforced Concrete. Buildings. 2022; 12(9):1436. <https://doi.org/10.3390/buildings12091436>
8. Salahaldein Alsadey, Miftah Abdallateef, Muftah Mohamed, Abdalrhman Milad. Investigating Behaviour of Reinforced Concrete with Glass Fibre. Jurnal Kejuruteraan 2021; 33(3):559–577. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2021-33\(3\)-16](https://doi.org/10.17576/jkukm-2021-33(3)-16)
9. Libo Yan, Nawawi Chouw. A comparative study of steel reinforced concrete and flax fibre reinforced polymer tube confined coconut fibre reinforced concrete beams. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2013; 32(16):1155–1164. <https://doi.org/10.1177/0731684413487092>
10. Abdullah O. Baarimah, Sharifah Maszura Syed Mohsin. Mechanical properties of steel/kenaf (hybrid) fibers added into concrete mixtures /IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2018; 342(1):012075. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/342/1/012075>

11. de la Fuente A., Lin L., Cavalaro S.H.P., Aguado de Cea A. Fibre reinforced precast concrete segments: design and applications. Proceedings of the World Tunnel Congress 2014 – Tunnels for a better Life. Foz do Iguaçu, Brazil.
12. Liao L., de la Fuente A., Cavalaro S., Aguado A. Design of FRC tunnel segments considering the ductility requirements of the Model Code 2010. Tunnelling and Underground Space Technology. 2015; 47: 200–210.
13. Serna P., Llano-Torre A., Martí-Vargas J., Navarro-Gregori J. Fibre Reinforced Concrete: Improvements and Innovations. RILEM-fib International Symposium on FRC (BEFIB) in 2020.
14. di Prisco M., Plizzari G., Vandewalle L. Fibre reinforced concrete: new design perspectives. Materials and Structures. 2009; 42:1261–1281. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9529-4>
15. di Prisco M., Tomba S., Bonalumi P., Meda A. On the use of macro synthetic fibres in precast tunnel segments. ITA WTC 2015 Congress and 41st General Assembly May 22–28, 2015. Lacroma Valamar Congress Center, Dubrovnik, Croatia.
16. di Prisco M., Colombo M., Dozio D. Fibre-reinforced concrete in fib Model Code 2010: principles, models and test validation. Structural Concrete. 2013. 14: 4. <https://doi.org/10.1002/suco.201300021>
17. Caratelli A., Meda A., Rinaldi Z., Romualdi P. Structural behaviour of precast tunnel segments in fiber reinforced concrete. Tunnelling and Underground Space Technology. 2011; 26: 284–291.
18. Barros J. Recent developments on the analysis and design of fibre reinforced concrete structures. 14th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”, 5–6 October 2023. Lithuania.
19. Winterberg R. Use of macro synthetic fibre in segmental tunnels. BEFIB2021, 096. v3.
20. Plükelmann S., Breitenbücher R., Smarslik M., Mark P. Aufnehmbare Teilflächenspannung von hochfestem. Stahlfaserbeton Beton- und Stahlbetonbau 2019. 114: Heft 9.
21. Hansel D., Guirguis P. Stahlfaserbeton-Tübbing: Stand der Technik und realisierte Projekte (Steel-fibre-reinforced segmental linings: State-of-the-art and completed projects). Tunnel. 2011; 1.
22. Smarslik M., Mark P. Hybrid reinforcement design of longitudinal joints for segmental concrete linings. Structural Concrete. 2019; 1–15. <https://doi.org/10.1002/suco.201900081>
23. Bernard E.S., Thomas A.H. Fibre reinforced sprayed concrete for ground support. Tunnelling and Underground Space Technology. 99 (2020) 103302.
24. Bernard E.S., Clements M.J.K., Duffield S.B., Morgan D.R. Development of Macro-synthetic Fibre Reinforced Shotcrete in Australia. In: Seventh International Symposium on Sprayed Concrete for Underground Use, June 16–19, Sandefjord, Norway. 2014; 67–75.
25. El-Helou R., Graybeal B. Flexural Behavior and Design of Ultrahigh-Performance Concrete Beams. Structural Engineering Journal. 2022.
26. Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community. PUBLICATION NO. FHWA-HRT-13-060, JUNE 2013.
27. Eryigit H., Sayin A., Kocak B. An overview of the construction of turkey's longest road tunnel focusing on ground support using macro synthetic fibers as shotcrete reinforcement. Engineering, Environmental Science. 2014.
28. Namli M. Evaluation of the effect of using fiber reinforcement in tunnel linings for metro projects. Underground Space 2021; 6 (6): 732–750.
29. Abbood I., Faleh Al-Bayati A. Punching shear strength of steel fibre reinforced concrete flat slabs: a literature review and design codes evaluation, Kerbala, Iraq, 2021.
30. Twenty years of FRC tunnel segments practice: lessons learnt and proposed design principles / ITA Report #16 / ISBN : 978-2-970 1013-5-2. April, 2016.
31. Design guidance for precast fibre reinforced concrete segments / ITAtech Report #7 / ISBN: 978-2-9701013-2-1/ April, 2016.
32. fib Model Code for Concrete Structures 2010, Ernst & Sohn, 2013 / ISBN:9783433030615 / <https://doi.org/10.1002/9783433604090>
33. Design of FRC tunnel segments considering the ductility requirements of the Model Code 2010 / Tunneling and Underground Space Technology, № 47, p. 200–210, 2015.
34. Matveev G., Kagan M. Key segments made of SFRC // Metrostroy. 1981. № 2. p. 10.
35. Kagan M. Density of segment reinforced by steel fibre // Metrostroy. 1985. № 1. pp. 29–30.
36. Cyvian B. Steel Fibre Reinforced Concrete linings // Metrostroy. 1986. № 4. pp. 30–31, № 6. pp. 29–32.
37. Kagan M. Comparison of the actual compressive strength of concrete and steel fibre reinforced concrete segments // Metrostroy. 1987. № 3. pp. 19–22.
38. Nekrasov V.P. The method of indirect reinforcing of concrete. M.: NKPS Transpechat, 1925.
39. ASTM C 1550. Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel).

40. Trabucchi I., Smarslik M., Tiberti G., Petrarola D.N., Plizzari G.A., Mark P. A hybrid solution proposal for precast tunnel segments. *Structural Concrete*. 2021; 1–15. <https://doi.org/10.1002/suco.202000629>
41. Meda A., Rinaldi Z., Spagnuolo S., De Rivaz B., Giamundo N. Experimental Behaviour of Precast Tunnel Segments in Steel Fiber Reinforcement with GFRP Rebars. *FRC2018: Fibre Reinforced Concrete: from Design to Structural Applications Joint ACI-fib-RILEM International Workshop*.
42. Tiberti G., Minelli F., Plizzari P. Reinforcement optimization of fiber reinforced concrete linings for conventional tunnels. *Composites. Part B* 58. 2014; 199–207.
43. Tengilimoglu O., Akyuz U. Experimental study on hybrid precast tunnel segments reinforced by macro-synthetic fibres and glass fibre reinforced polymer bars. *Tunnelling and Underground Space Technology* 2020; 106.
44. Conforti A., Trabucchi I., Tiberti G., Plizzari G., Caratelli A., Meda A. Precast tunnel segments for metro tunnel lining: A hybrid reinforcement solution using macro-synthetic fibers. *Engineering Structures*. 2019; 199: 109628, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109628>
45. Facconi L., Amin A., Minelli F., Plizzari G. A unified approach for determining the strength of Frc members subjected to torsion—Part I: Experimental investigation. *Structural Concrete*. 2021; 1–17. <https://doi.org/10.1002/suco.202100161>
46. Medeghini F., Guhathakurta J., Tiberti G., Simon S., Plizzari G., Mark P. Steered fiber orientation: correlating orientation and residual tensile strength parameters of SFRC. *Materials and Structures*. 2022; 55:251. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-02082-9>
47. Carmona S., Molins C., García S. Application of Barcelona test for controlling energy absorption capacity of FRS in underground mining works. *Construction and Building Materials* 2020; 246.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Русанов Владимир Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент, генеральный директор ООО «НИЦ «Тоннельная ассоциация», Москва, Россия, rusanov.ve@nizta.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8199-7214>

Маслов Павел Сергеевич – руководитель направления Стальная фибра ОАО «Северсталь-метиз», Череповец, Вологодская область, ps.maslov@severstalmetiz.com, <https://orcid.org/0009-0005-0241-8712>

Алексеев Вячеслав Александрович – директор НОЦ «Подземное строительство», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, 634586@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2705-5354>

ВКЛАД АВТОРОВ

Русанов В.Е. – научное руководство, концепция исследования; написание исходного текста.

Маслов П.С. – концепция исследования, написание исходного текста.

Алексеев В.А. – научное руководство, итоговые выводы, написание исходного текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 10.04.2024; одобрена после рецензирования 29.05.2024; принята к публикации 04.06.2024.