

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2023-85-1-120-142

ОБЗОР МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФИБРОБЕТОНОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ И СЖАТИИ*

© 2023 г.

**Гонов М.Е.¹, Макаров Н.С.²,
Игумнова О.Л.², Сабаева Т.А.², Денисова Н.А.²**

¹*Научно-исследовательский институт механики
Национального исследовательского Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

²*Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

briz_2007@list.ru

Поступила в редакцию 22.11.2022

Представлен обзор механических свойств фибробетонов при высоких скоростях деформации при растягивающих и сжимающих напряжениях. Фибробетон широко используется при строительстве защитных сооружений, инженерных сооружений в сейсмических районах, взлетно-посадочных полос аэропортов, речных и морских инженерных сооружений, в тоннелях и является важным заменителем классического бетона.

Обзор охватывает следующие аспекты: преимущества и недостатки различных методов испытаний, используемых для определения динамических свойств фибробетонов; исследования динамических характеристик фибробетонов при сжатии и растяжении, включая их прочность, деформационную способность и способность поглощать энергию. Цель этого обзора – расширить фундаментальные знания о динамических свойствах фибробетона и способствовать дальнейшим исследованиям его физико-механических характеристик и областей применения для повышения прочности хрупких материалов.

В начале обзора рассматриваются наиболее часто используемые испытательные установки и методики для динамических испытаний, например, метод Кольского, который широко используется для определения свойств при динамическом сжатии, растяжении и растяжении при раскалывании при высоких скоростях деформации. Далее, в основной части обзора рассматриваются различные типы фибробетонов и типы применяемой фибры, механические свойства фибробетонов при динамическом сжатии и растяжении, включая прочность, ударную вязкость, способность поглощать энергию. Исследования показали, что с увеличением скорости деформации растет динамическая прочность фибробетона. Использование соответствующего количества волокна приводит к значительному улучшению динамических свойств, однако существует пороговое содержание волокон. В заключение отмечено, что для разрушения фибробетона требуется дополнительная энергия для преодоления вязкости волокон и вытягивания их из цементной матрицы. Это улучшает общую несущую способность бетона, что приводит к увеличению энергии, необходимой для разру-

* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 22-19-00138).

шения. Модифицированные волокна не только улучшают динамическую прочность бетона, но и повышают его ударную вязкость.

Ключевые слова: фибробетон, динамические свойства, метод Кольского, динамическое сжатие, динамическое растяжение.

Введение

Бетонные материалы, используемые в гражданской и военной инфраструктуре, подвергаются катастрофическим разрушениям при интенсивных динамических воздействиях (взрывах, ударах, сильных землетрясениях). Следовательно, подобные хрупкие материалы должны быть более устойчивы к разрушению по сравнению с традиционными материалами за счет использования дополнительных компонентов с высокой способностью поглощать энергию. В последние годы при проектировании и строительстве ответственных объектов фибробетон привлек большое внимание благодаря своей хорошей ударпрочности и взрывостойкости, а также более высокой ударной вязкости по сравнению с обычным бетоном.

Первые исследования, посвященные дисперсно-армированному стальной фиброй бетону, были выполнены российским инженером В.П. Некрасовым в 1907 г., получившим в 1909 г. патент на фибробетонную конструкцию. Однако первое практическое применение фибробетона в России можно датировать только 1976 годом при строительстве взлетно-посадочной полосы.

В [1] рассмотрен совместный эффект взаимного влияния заполнителей и волокон в фибробетоне на процесс развития трещин. Как показано на рис. 1, процесс от начала зарождения трещины до разрушения образца можно условно разделить на три зоны: роста микротрещин и макротрещин; перекрытия трещин волокнами; отсутствия связей в трещинах.

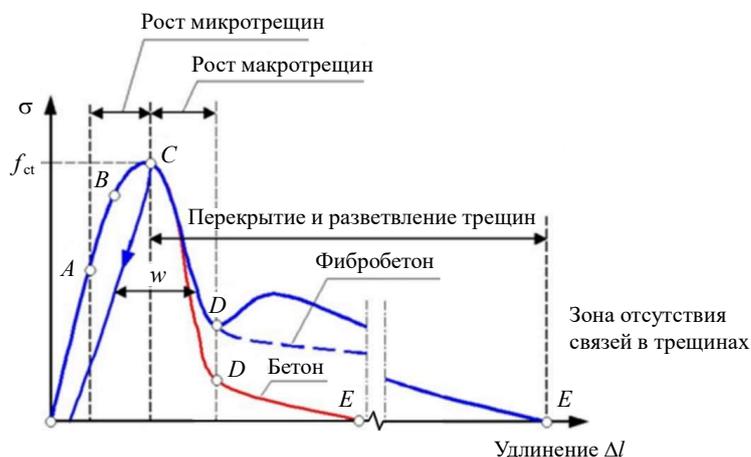


Рис. 1. Схематическое описание взаимосвязей между растягивающим напряжением σ и раскрытием трещин для простого бетона и фибробетона

При увеличении напряжения, начиная с точки *A*, растут микротрещины первоначально на границе между цементом и заполнителями, затем микротрещины распространяются в цементную основу (точка *B*). Как только достигается пиковое напряжение f_{ct} (точка *C*), микротрещины распространяются нестабильно и происходит их локализация, в результате чего по образцу распространяются макротрещины, что

приводит к падению напряжения (точка *D*). Перекрытие и разветвление трещин являются основным механизмом, ответственным за длинный хвост размягчения (разрыхления) материала (участок *D–E*), наблюдаемый в экспериментах и связанный с потерей несущей способности. Но так как процесс разрушения в значительной степени зависит от заполнителей и их связи с цементной матрицей, то для высокопрочного бетона и бетона с легким заполнителем он различен. Для этих двух типов бетона заполнители могут стать слабым звеном и может произойти разрыв заполнителя, что снижает эффект перекрытия и приводит к более хрупкому процессу разрушения. В зависимости от количества волокон, пересекающих трещину, и хорошей связи волокон с цементной матрицей напряжение после трещины может быть больше, чем нагрузка растрескивания, что приводит к так называемому деформационному упрочнению, при котором возникают множественные трещины. Однако при нормальном содержании фибры (<1%) бетон проявляет деформационное разупрочнение, при котором повреждение локализуется сразу после возникновения первой трещины.

По сравнению с обычным бетоном улучшенные свойства высокопрочного фибробетона приводят к повышенным показателям деформации при растяжении, а также к развитию псевдопластической фазы (деформационное упрочнение) до разрушения бетона, что является причиной высокого поглощения энергии (вязкости разрушения) [2]. Энергия разрушения высокопрочного фибробетона также может быть значительно выше (примерно в пять раз), чем у простого фибробетона [2]. Оптимальное содержание волокна в фибробетоне зависит от класса, типа волокна и соотношения его длины и диаметра. Для микроволокон, изготовленных из органического порошка PVA (поливиниловый спирт) и полиэтилена, было обнаружено, что оптимальное их содержание в вяжущем материале с деформационным упрочнением находится в диапазоне 1–2% [3, 4]. В случае стальных волокон этот диапазон в высокопрочном фибробетоне составляет от 1,5 до 2,5% [5–7]. Различия в оптимальном уровне содержания волокон можно объяснить различным соотношением длины используемых волокон и их диаметра. Для макроволокон из полипропилена (длиной до 70 мм) этот оптимум составляет от 0,5 до 1% [8, 9], в то время как для традиционных фибробетонных плит типичным считается содержание до 0,5% стальных макроволокон [10].

Фибробетон все чаще используется для усиления конструкций, чувствительных к землетрясениям и динамическим воздействиям [11]. Более высокая прочность, пластичность и вязкость разрушения фибробетона снижают риск повреждения конструкции из-за динамической сейсмической нагрузки. Благодаря своим лучшим механическим характеристикам и долговечности, фибробетон также стал популярным материалом для подземных сооружений в сейсмически активных районах [12]. Несколько исследований были сосредоточены на анализе чувствительности реакции конструкции во время сейсмической нагрузки к изменению механических параметров [13, 14]. Для практического использования фибробетона важно понимать его долговременные характеристики в различных условиях окружающей среды. По сравнению с обычным бетоном область применения фибробетона менее развита, поэтому в последние годы были предприняты значительные исследования, направленные на более широкое применение фибробетона.

В статьях [15, 16] проанализировано динамическое поведение фибробетона при растяжении и сжатии. Отмечено, что чувствительность фибробетона к скорости деформации при растяжении аналогична чувствительности обычного бетона при квази-

статических и промежуточных скоростях деформации, а при высоких скоростях деформации фибробетон гораздо более чувствителен к скорости деформации, чем обычные бетоны. Динамическая прочность на сжатие увеличивается с понижением температуры, а максимальная деформация при повышенной температуре увеличивается по сравнению с деформацией при комнатной температуре. Модуль упругости уменьшается с увеличением скорости деформации при высоких температурах (200–800 °С). Однако исследования динамических свойств фибробетона при сжатии при низких температурах ограничены и следует принимать во внимание некоторые важные факторы, такие как степень капиллярного насыщения и влияние условий замораживания-оттаивания. В [17] авторы обобщили динамическое поведение фибробетона при ударных и взрывных нагрузках, включая выводы по характеристикам сжатия, растяжения и изгиба. В статье [18] обобщена широко используемая модель прогнозирования коэффициента динамического упрочнения для фибробетона. В [19] подытожен ход исследований методов мезомасштабного моделирования, применяемых к фибробетону при динамических нагрузках. Тем не менее, необходимы дальнейшие исследования в нескольких областях. А именно, мало изучено влияние на динамические свойства бетона скорости деформации и содержания в нем волокон. Исследования показали, что существует определенный синергетический эффект влияния скорости деформации и наличия волокна на динамические свойства фибробетона. Посредством дальнейших исследований можно получить более глубокое понимание эффекта улучшения динамических свойств при использовании в фибробетоне модифицированных волокон (спиралевидных, волнистых, крючкообразных), которые отличаются от простых более сложной формой или наличием геометрических особенностей. По сравнению с простыми волокнами модифицированные волокна демонстрируют улучшение динамических свойств бетона. Это связано с различиями физико-механических свойств модифицированных волокон разных типов и размеров. Размеры трещин могут быть уменьшены с помощью этих волокон, что значительно улучшает динамические свойства бетона.

Один из самых спорных вопросов в исследованиях фибробетона относится к влиянию многоосного давления на динамические свойства фибробетона. Большинство исследований динамических свойств фибробетонов были сосредоточены на одноосном напряженном состоянии. Однако в практической инженерии фибробетон может находиться в многоосном напряженно-деформированном состоянии (например, в балках, соединениях балок и колонн), поэтому необходимо учитывать динамическую реакцию фибробетона при многоосном напряженно-деформированном состоянии.

Важно отметить, что добавление волокон в бетонную смесь снижает объем выбрасываемой бетонной пыли, мелких, средних и крупных обломков в воздух при динамическом разрушении и, как следствие, снижает уровень травматизма и смертности. Таким образом, фиброармирование является хорошим средством преодоления конкретных недостатков бетона, при этом стальные волокна более широко используются в строительстве по сравнению с другими типами волокон.

Методы испытаний

В процессе эксплуатации фибробетон может испытывать нагрузки в широком скоростном диапазоне: от квазистатических до высокоскоростных [20]. На рис. 2

показан спектр скоростей деформаций и соответствующий набор экспериментальных средств для реализации испытаний в этом спектре.



Рис. 2. Экспериментальные средства и применяемый диапазон скоростей деформации [16]

Установки, которые обычно применяются для определения механических свойств бетона при динамических нагрузках, включают: метод Кольского с разрезным стержнем Гопкинсона (РСГ) и его модификации, установки с падающим грузом, модификации РСГ для раскалывания (бразильский тест), модификации РСГ и установки для прямого испытания на растяжение. Метод Кольского используют для получения динамических диаграмм деформирования, предельных прочностных, деформационных и энергопоглощающих характеристик фибробетона. Классическая установка по методу Кольского состоит из нагружающего и опорного стержней, газовой пушки и устройства поглощения энергии (рис. 3 [21]). Падающая волна генерируется ударником, разгоняемым в стволе газовой пушки, за счет его удара о торец нагружающего стержня. Часть падающей волны проходит через образец, образуя прошедшую волну, а другая часть падающей волны отражается, образуя отраженную волну из-за разницы акустических жесткостей (импеданса) образца и стержней. Деформации в стержнях измеряются с помощью тензодатчиков. По формулам, предложенным Кольским, определяются напряжения, деформации и скорости деформации в образце.

В методе Кольского [22] влияние сил трения, неоднородности напряжений, дисперсии волн и инерции образца можно свести к минимуму, используя разумное соотношение размеров образца, смазку торцевой поверхности стержней и образца, а также регулируя форму волны нагрузки за счет применения формирователей нагружающего импульса.

Типы фибробетона и применяемой фибры

За последнее время были разработаны различные классы фибробетона, отличающиеся материалом и формой фибры (модификациями фибры). Традиционно волокна классифицируются по виду исходного материала. Обычно используются металлические, стеклянные, синтетические и натуральные волокна. Различают микроволокна (короче 20 мм с эквивалентным диаметром 0,005–0,2 мм) и макроволокна (длиной 20–80 мм с отношением длины к диаметру, равным 40–120). Используются волокна различного поперечного сечения (плоские, круглые, прямоугольные и др.). Физические свойства обычно используемых типов волокон приведены в таблице 1.

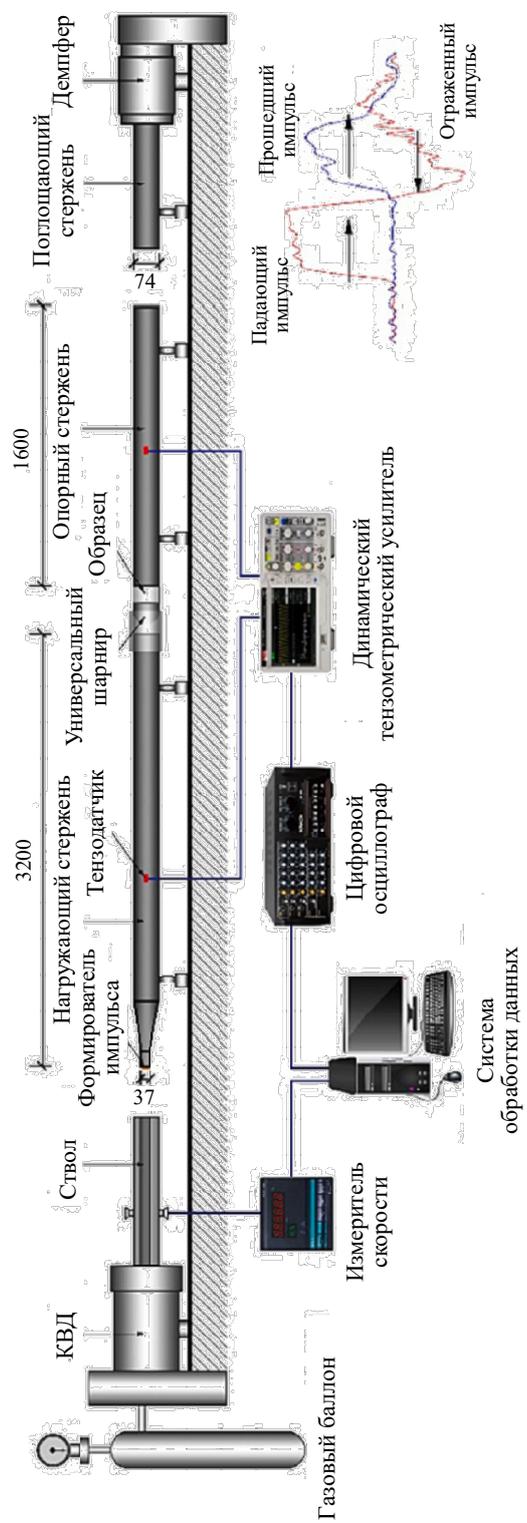


Рис. 3. Схематическое изображение устройства РСГ [21]

Таблица 1

Физические свойства используемых типов фиброволокон [23]

Материал фиброволокна	Диаметр, мм	Длина, мм	Удельный вес, г/см ³	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, ГПа	Максим. удлинение, %
Сталь	0,005–1	10–60	7,85	200–2600	195–210	0,5–5,0
Полиэтилен (ПЭ)	0,025–1	–	0,96	80–600	1,4–5	12–100
Высокомодульный ПЭ	0,02–0,024	6–12	0,97	2500–3000	80–120	2,5–5
Фенилен-бензобисоксазол после формовки	0,013	6	1,54	5800	180	3,5
Полипропилен	0,01–0,2	5–50	0,90–0,91	310–760	3,5–14,7	6–15
Поливиниловый спирт	0,009–0,76	6–12	1,2–2,5	800–3600	20–80	4–12
Стекло	0,006–0,035	10–50	2,54–2,70	1500–4000	72–80	2,5–4,8
Джут	0,1–0,2	–	1,02–1,04	250–350	25–32	1,5–1,9
Асбест	0,025	5–40	2,55–3,2	200–1800	164	2–3
Углерод	7–20	3–12	1,2–2	600–4000	200–390	0,4–11

Обычно используемые волокна представляют собой жесткие волокна (например, стальные [24–26], углеродные [27, 28], базальтовые [29] и стеклянные [30–32]), гибкие полипропиленовые [33, 34] и поливиниловые спиртовые волокна (ПВС) [35, 36], растительные волокна [37]. Как известно, конструкции, состоящие из фибробетона, могут испытывать воздействия интенсивных динамических нагрузок, таких как землетрясения, ураганы, взрывы, воздействие снаряда и т.д. Каждая из этих динамических нагрузок вызывает высокоскоростную деформацию бетона или фибробетона по сравнению с квазистатическими воздействиями [38, 39]. Механическое поведение фибробетонов чувствительно к скорости деформации при ударных нагрузках как при сжатии, так и при растяжении, поскольку распространение и рост трещин, а также сила трения чувствительны к скорости деформации [40]. Инерционный эффект распространения трещины [41] и эффект поперечной инерции [42] являются основными механизмами, связанными с влиянием скорости деформации на динамические свойства бетона и фибробетона. Подробное обсуждение и анализ исследований динамических свойств фибробетона необходимы для расширения сфер его применения в различных несущих и защитных конструкциях.

В настоящее время существует множество типов фибробетона со стальной фиброй, среди которых выделяют пять основных.

1. Фибробетон с прерывистыми дискретными стальными волокнами. Тысячи мелких стальных волокон рассредоточены и беспорядочно распределены в бетоне для улучшения его механических свойств. Как указано в [43], объемная доля волокна, используемого в этом типе фибробетона, должна находиться в пределах 0,5–1,5%, так как превышение этого значения может снизить удобоукладываемость бетонной смеси и вызвать комкование волокон фибры, которое будет чрезвычайно трудно преодолеть при виброуплотнении. Тем не менее, более высокий процент волокна можно использовать с помощью специальных методов добавления волокон и процедур их равномерного распределения.

2. Высокопрочный фибробетон (High-performance fiber-reinforced concrete – HPFRC) обычно имеет прочность на сжатие до 100 МПа. По сравнению с обычным высокопрочным бетоном, являющимся хрупким материалом, пластичность фибро-

бетона может быть увеличена путем добавления коротких случайно распределенных волокон с объемной долей в 2,0% или более. Добавление стальной фибры в высокопрочный бетон не только повышает прочность и пластичность бетона, но и улучшает его сопротивление удару и разрушению.

3. Специальный фибробетон – это особый тип высокопрочного бетона, армированного фиброй с высокой прочностью (150–400 МПа) и большой объемной долей фибры (5–10%). Матрица специального фибробетона чрезвычайно пластична из-за высокого содержания стальной фибры. Эта особенность позволяет эффективно использовать фибровую арматуру без образования больших трещин в условиях эксплуатации.

4. Сверхвысокопрочный фибробетон (Ultra-high performance fiber-reinforced concrete – UHP-FRC) – это новый класс материалов, сочетающих в себе очень прочную и плотную вяжущую цементную основу с высоким содержанием волокна. Этот материал обладает высокой прочностью на сжатие (порядка 200 МПа) и относительно большой прочностью на растяжение (порядка 10 МПа) наряду с характеристиками деформационного упрочнения при растяжении, что гарантирует малое раскрытие трещин и обеспечивает улучшенные свойства пластичности по сравнению с обычным бетоном. При этом волокна обеспечивают пластичность как при растяжении, так и при сжатии. Добавление достаточно большого количества волокон (более 1,5% от объема) приводит к деформационному упрочнению при растяжении [44]. Кроме того, сверхвысокопрочный фибробетон может значительно улучшить ударопрочность панелей и стен при сохранении стандартной толщины и внешнего вида [45].

5. Комбинированный фибробетон определяется как бетон с комбинациями различных типов волокон. Два или более типа волокон различной формы и размера, полученных из разных материалов, комбинируются, чтобы материал имел полезные характеристики относительно каждого типа волокна.

В зависимости от объемного содержания волокон фибробетон можно разделить на три группы. Низкое объемное содержание волокна (менее 1%) обычно используется для предотвращения усадочных трещин с минимальным увеличением прочности. Среднее объемное содержание волокна (1–2%) применимо в качестве дополнения к основному армированию и для обеспечения хорошей обрабатываемости для монолитных или сборных фибробетонных конструкций. Высокое объемное содержание волокна (более 2%) может существенно улучшить такие механические свойства, как вязкость разрушения, повышенная пластичность и деформационное упрочнение. Добавление стальной фибры значительно снижает хрупкость бетона и преодолевает некоторые из его недостатков. Доступны несколько форм стального модифицированного волокна (прямые, одинарные с крючками, гофрированные с крючками, скрученные, со сплюснутыми концами).

Динамические свойства фибробетона при сжатии

Бетон очень чувствителен к скорости деформации при сжатии, растяжении и изгибе [46]. Поскольку в разных скоростных диапазонах зависимости прочностных и деформационных характеристик различны, то квазистатические свойства бетона не могут использоваться для проектирования конструкций, работающих при высоких скоростях нагружения. Следовательно, требуются соответствующие испытания на удар. В последние годы было проведено несколько исследований бетона [47–49], мо-

дифицированного бетона из фибропласта [50, 51], высокопрочного бетона [52, 53], сверхвысокопрочного бетона [54, 55], геополимерного бетона [56–58], фибробетона с полимерной фиброй [59, 60] при ударных и взрывных нагрузках.

Добавление волокон значительно (от 20 до 50%) увеличивает динамическую прочность на сжатие [61]. Под действием динамической нагрузки волокна фибробетона могут передавать напряжение на окружающую их цементную основу, препятствуя образованию и распространению трещин и тем самым изменяя динамические свойства исходного бетона. Большое трение волокон и скорость деформации являются важными факторами, влияющими на динамические свойства фибробетона. В определенных пределах характеристики прочности, ударной вязкости и способности бетона рассеивать энергию могут быть улучшены за счет увеличения содержания в нем волокон.

В [62] авторами показано, что динамическая прочность и энергия разрушения увеличились соответственно на 17,6–25,1% и 29,7–51,1% после добавления переработанного шинного волокна. Исследования в [63] показали, что углеродное волокно может повысить динамическую прочность на сжатие на 21,47–26,58%. В статье [64] описаны испытания по методу Кольского бетона, армированного стальной фиброй, результаты показали, что стальная фибра увеличивает показатель предельной деформации и ударной вязкости на 29,3 или 48,2%. В процессе испытаний [65] обнаружено, что стальная фибра увеличивает динамическую прочность при сжатии на 20–46%. Зависимость динамического напряжения от деформации фибробетона может быть грубо разделена на стадии уплотнения, линейной упругости, пластической текучести и разрушения. На стадии линейной упругости нагрузка воспринимается как цементной основой, так и волокном, и зависимость между напряжением и деформацией приблизительно линейна. После достижения стадии текучести наблюдается зарождение и распространение микротрещин в бетоне, и волокно начинает рассеивать большое количество энергии. Диаграмма деформирования при этом нелинейна. На стадии разупрочнения изолированные трещины постепенно расширяются и соединяются между собой, образуя зону разрушения [66].

Величина напряжения, соответствующая пиковой точке на динамической кривой напряжения–деформации, была определена как динамическая прочность на сжатие, которая может отражать прочностные характеристики фибробетона при динамической нагрузке.

С увеличением скорости деформации включается механизм вязкого демпфирования. Инерционный эффект начинает проявляться при дальнейшем увеличении скорости деформации. Образование трещины потребляет больше энергии, чем распространение трещины. Чем выше скорость деформации, тем больше образуется трещин с большими энергозатратами [38, 67]. После вытягивания волокна в цементной основе остается много канавок, поверхность волокна частично покрывается продуктами гидратации, что указывает на то, что связь между волокном и цементной матрицей становится прочнее при динамической нагрузке. Случайно распределенное волокно препятствует распространению трещин и ограничивает поперечную деформацию фибробетона.

Динамические свойства бетона могут быть значительно улучшены за счет количественного содержания фибры. Однако на однородность бетона отрицательно влияет чрезмерное содержание волокон [68]. Пустоты между волокнами могут приводить к концентрации напряжений, увеличению пор и микротрещин внутри фибро-

бетона. Некоторые волокна (поливиниловые спиртовые волокна) имеют гидрофильную поверхность, и в случаях когда содержание волокна слишком велико, бетон в процессе формирования поглощает большое количество воды [69]. Поэтому плотность цементной основы вблизи окружающих волокон снижается, и микротрещины легко расширяются в макротрещины, снижая прочность материала на сжатие. Кроме того, избыточное содержание волокон вызывает явление комкования в цементной основе, что увеличивает количество внутренних дефектов и неоднородность [70]. Следовательно, пустоты в бетоне не могут быть эффективно заполнены, что приводит к снижению плотности бетона.

Энергетические характеристики

Соответствующее количество волокна может увеличить целостность цементной матрицы и уменьшить концентрацию напряжения, вызванного динамической нагрузкой. Волокна также могут поглощать определенное количество энергии удара, препятствуя образованию трещин [71, 72].

Поступающая энергия в фибробетон постепенно преобразуется в энергию упругой деформации. По мере дальнейшего нагружения микротрещины начинают расширяться, потребляя часть энергии, затем они образуют макротрещины. Часть энергии рассеивается в виде пластической энергии. Однако большая часть энергии, присутствующей на протяжении всего процесса, преобразуется в накопленную энергию упругой деформации. По мере продолжения воздействия нагрузки макротрещины продолжают расширяться. Когда энергия упругой деформации достигает своего предела, она высвобождается и преобразуется в новую поверхностную энергию [73].

С увеличением скорости деформации образуется больше микротрещин и для их распространения требуется больше энергии [70]. В течение всего процесса разрушения фибробетона требуется дополнительная энергия для преодоления жесткости волокон и вытягивания волокон из цементной матрицы. Эффект рассеивания энергии в бетоне возрастает с усилением связей между волокнами и цементной основой [74]. Как показано на рис. 4, энергия, идущая на вытягивание волокон или преодоление армирующего эффекта волокон, сопоставима с энергией образования трещин.

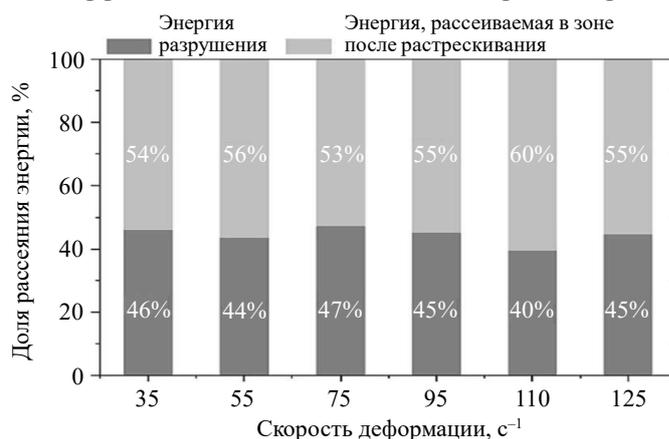


Рис. 4. Доля энергии разрушения в фибробетоне [62]

Кроме того, под действием динамической нагрузки трещины в бетоне быстро расширяются. Связь между волокнами и матрицей усиливается, способность бетона

рассеивать энергию также увеличивается [75]. Удельное поглощение энергии (SEA) при использовании метода Кольского описывается как количество энергии волны напряжения на единицу объема бетона:

$$SEA = \frac{A_0 C_0 E_0}{A_s l_s} \int [\varepsilon_i^2(t) - \varepsilon_t^2(t) - \varepsilon_r^2(t)] dt, \quad (1)$$

где A_0 – площадь сечения мерного стержня, E_0 – модуль упругости мерного стержня, C_0 – скорость распространения звука в мерном стержне, A_s – площадь сечения образца, l_s – длина образца, ε_i – падающий импульс деформации, ε_t – прошедший импульс деформации, ε_r – отраженный импульс деформации мерного стержня.

Типичное разрушение фибробетона

Режимы разрушения фибробетона при динамических нагрузках можно разделить на растрескивание краев, нарушение целостности центральной части, разрушение от выкрашивания и разрушение с измельчением частиц с увеличением скорости деформации, как показано на рис. 5.



Рис. 5. Образцы фибробетона после динамического воздействия [66]

Режим разрушения меняется с увеличением скорости деформации. При низкой скорости нагружения в бетоне появляются цельные и крупные элементы. По мере увеличения скорости нагружения трещины распространяются от края к внутренней части и проходят через бетонное ядро. По мере увеличения количества фрагментов размер фрагментов уменьшается, а образец сохраняет целостность сердцевины благодаря армирующему эффекту волокон. При дальнейшем увеличении скорости нагружения образец постепенно разрушается до мелких и пылеобразных частиц. При этом с ростом скорости нагружения и ростом амплитуды нагрузки количество микротрещин и макротрещин увеличивается, и образцы раскалываются на более мелкие фрагменты. В статье [64] авторами показано, что режим разрушения фибробетона под динамической нагрузкой связан с характером образования трещин. Под действием динамической нагрузки трещины в бетоне постепенно сливаются друг с другом. По сравнению с обычным бетоном сеть трещин на поверхности фибробетона более развита, а распределение более равномерное.

Волокна оказывают эффективное подавляющее действие на боковую деформацию и растрескивание цементной матрицы, тем самым повышая прочность и ударную вязкость фибробетона [76]. Трещины первоначально появляются в верхних и боковых краевых областях бетона главным образом из-за растягивающего напряжения, возникающего в радиальном направлении. Затем трещины постепенно распространяются и сливаются в крупные трещины. Было показано, что армирующий эффект волокон оказывает подавляющее действие на образование и рост трещин. Таким образом, по-

ведение образцов фибробетона под действием динамической нагрузки можно эффективно контролировать [77].

Динамические свойства фибробетона при растяжении

В связи с ограничениями доступного испытательного оборудования и методов испытаний динамические свойства фибробетонов на растяжение мало исследованы. На результаты испытаний влияют методы нагружения, испытательное оборудование и размер образца. Наиболее часто проводятся испытания на динамическое раскалывание и прямое испытание на растяжение.

Высокая прочность на растяжение является основной характеристикой высококачественного фибробетона [78]. Поведение фибробетонов зависит от многих факторов: от соотношения длины и диаметра волокна, модуля упругости, доли объемного процента волокна, включенного в композит, ориентации волокон, удобоукладываемости бетона, размера крупных заполнителей. Следовательно, чтобы получить максимальную выгоду от использования волокон, все эти факторы необходимо учитывать при проектировании материала и конструкции фибробетона. Некоторые преимущества использования различных типов фибробетона показаны на рис. 6 (*a* – сравнение различных типов бетона при растяжении; *b* – трещины в вяжущем материале с деформационным упрочнением; *в* – раскрытие устья трещины в балке с надрезом для различного объема стальных волокон; *г* – фибробетон, подвергнутый испытанию на раскалывание [79–82]).

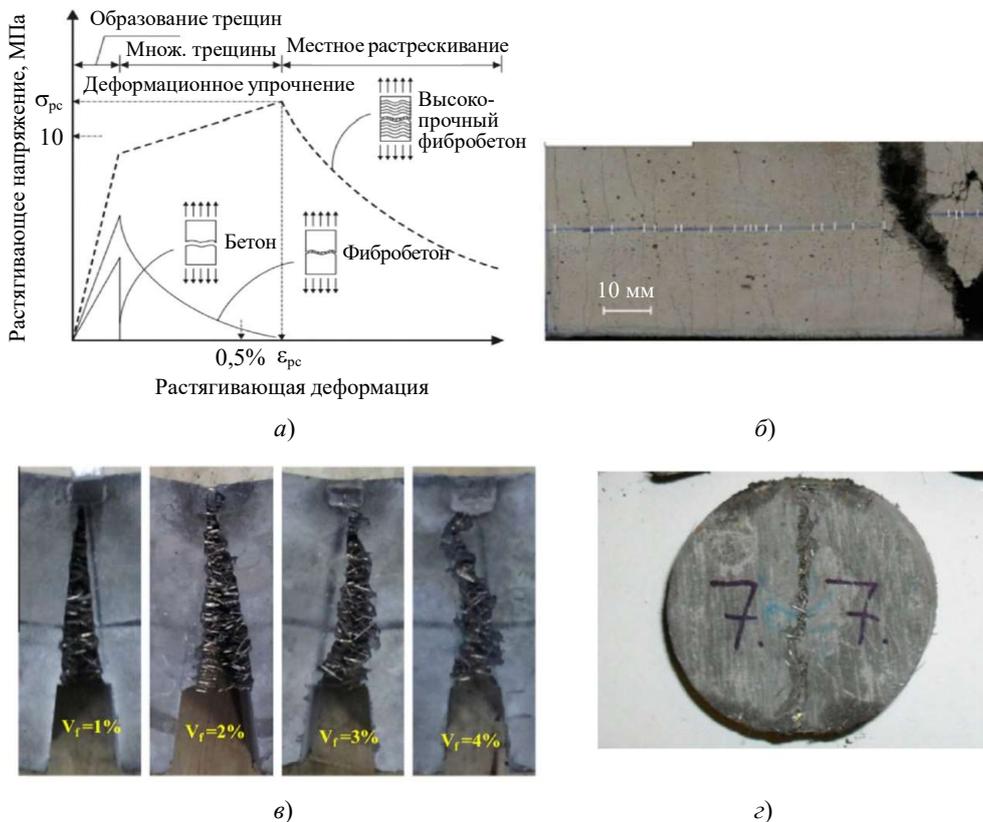


Рис. 6. Преимущество использования армирующей фибры в бетоне

Как уже сказано, наличие волокон улучшает динамические свойства бетона при растяжении. В статье [83] авторами показано, что переработанные волокна шин улучшают динамическую прочность на раскалывание и энергопоглощение на 5,5–14,2% и 24,9–36,7%. Согласно [84], армирование стальным волокном может увеличить динамическую прочность на растяжение до 28 или 44% при объемной доле стального волокна в 2%. Исследование [85] показало, что пиковое напряжение и индекс ударной вязкости увеличились соответственно на 46,19 и 34,11% после добавления волокон. Трехмерное неупорядоченное распределение волокон в бетоне может снизить концентрацию напряжений и вызвать их перераспределение [86]. Наличие волокон распределяет напряжения на более широкую область, снижая возможность образования и распространения трещин. Таким образом, снижается степень повреждения фибробетона [87]. Неповрежденный бетон оказывает ограничивающее давление на окружающий бетон, тем самым увеличивая динамическую прочность на растяжение при раскалывании [88]. При соответствующем содержании волокон их наличие может перекрывать существующие трещины, вызванные динамической нагрузкой. Если содержание волокон слишком велико, распределение волокон становится неравномерным, а размер слабой поверхности увеличивается, что ослабляет армирующий эффект.

В [89, 90] были проведены исследования механических свойств фибробетона со стальными волокнами при статических и динамических нагрузках. Установлено, что прочностные свойства бетона при растяжении и изгибе могут быть увеличены путем случайного распределения стальных волокон в бетонной смеси.

Цементный раствор при динамическом воздействии разрушается раньше, чем другие компоненты бетона. Это связано с тем, что прочность заполнителя больше, чем прочность поверхности раздела между заполнителем и раствором [91]. Однако граница между заполнителем и раствором не успевает накопить энергию, необходимую для сопротивления растягивающей силе, возникающей из-за внезапной динамической нагрузки за очень короткое время с возрастающей скоростью нагружения. Это приводит к высокой скорости разрушения заполнителя. Поскольку предел прочности при растяжении заполнителя больше, чем у композита из цементного раствора, скорость разрушения бетонного заполнителя увеличивается с увеличением скорости нагружения, также увеличивается прочность на разрыв при раскалывании [39]. Армирующее действие волокон на бетон при низких скоростях деформации выше, чем при высоких скоростях деформации. С увеличением скорости деформации скорость роста растягивающих напряжений постепенно уменьшается. Это явление становится более выраженным по мере увеличения содержания волокон. Такой эффект может быть связан с тем, что интервал времени между образованием новых трещин и вытягиванием волокон становится короче с увеличением приложенных амплитуд нагрузки, скорости деформации и уменьшением времени действия нагрузки. Время, необходимое для создания новой трещины, меньше, чем время вытягивания волокна [92].

Как показано на рис. 7, большинство концов волокон относительно целые, когда скорость деформации низкая, а характер разрушения фибробетона в основном связан с выдергиванием волокна. По мере увеличения скорости деформации наблюдается явное сужение волокон на срезе, то есть происходит деформация волокон за счет концентрации напряжений в узкой части волокна, при этом количество обрывов волокон значительно увеличивается. Поскольку разрушение волокна при выдергива-

нии потребляет больше энергии, чем преждевременный разрыв, фибробетон имеет лучшую способность рассеивания энергии при низких скоростях деформации.

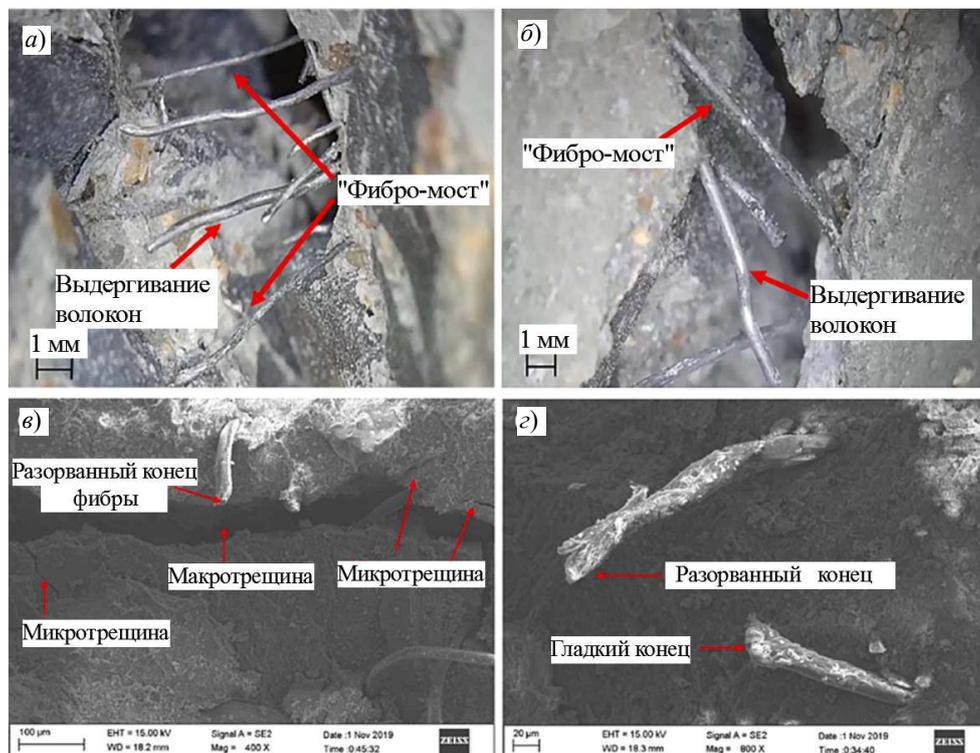


Рис. 7. Морфология (а, б) и микрофотография (в, г) волокон внутри фибробетона после выдергивания [83]

Степень повреждения фибробетона в основном отражается в размере зоны разрушения при сдвиге и ширине зоны разрушения при растяжении. Степень повреждения растет с увеличением скорости нагружения при одном и том же содержании волокон.

Скорость деформации также влияет на пиковые и предельные деформации фибробетона при растяжении, которые возрастают с увеличением скорости деформации. Суммарная деформация увеличивается из-за трансформации микротрещин в макротрещины. Добавление волокон снижает концентрацию напряжения в вершине трещины. Более того, когда напряжение достигает своего максимума, начинается разупрочнение, и перед разрушением накапливается значительная деформация [93].

В испытании падающим грузом ударная вязкость характеризуется количеством ударов, когда бетон выдерживает ударную нагрузку до разрушения [94, 95]. Вязкость можно рассчитать по площади перед пиком на кривых напряжение–деформация с использованием метода Кольского. Исследования показали, что фибробетон все еще может противостоять динамической нагрузке даже после достижения пикового значения напряжения [96, 97]. В некоторых исследованиях для определения характеристики ударной вязкости рассчитывали площадь под всей кривой [64]. Однако в конце кривой влияние динамической нагрузки незначительно; следовательно, эта часть кривой не может отражать сопротивление фибробетона ударной нагрузке.

В статье [64] определен показатель ударной вязкости:

$$IT_i = \int_0^2 \sigma_{con} d\varepsilon_{con}, \quad (2)$$

где σ_{con} – нормированное напряжение, ε_{con} – нормированная деформация; IT_i сочетает в себе преимущества вышеуказанных индексов и всесторонне учитывает различные влияющие факторы, которые могут лучше отражать ударную вязкость фибробетона при ударных нагрузках. Положительное влияние волокон на ударную вязкость можно частично объяснить сдерживанием образования трещин волокнами [98]. Когда трещина распространяется вблизи волокна, высокое напряжение в вершине трещины передается волокну, уменьшая концентрацию напряжения в цементной матрице. Связывающий эффект волокон в бетонных трещинах расширяет зону деформационного размягчения, повышая ударную вязкость бетона [99].

Заключение

Рассмотрены динамические свойства фибробетона и кратко представлены основные преимущества и недостатки стандартных установок и методов испытаний, используемых для определения динамических свойств фибробетонов.

На основе приведенного обзора можно сделать следующие выводы.

Метод Кольского наиболее широко используется для определения свойств при динамическом сжатии, растяжении и растяжении при раскалывании при высоких скоростях деформации. Этот метод основан на одномерной теории распространения волны напряжения, с помощью которой определяются основные соотношения, пиковая деформация и рассеянная энергия. При использовании стержней большого диаметра необходимо учитывать эффекты дисперсии волн, боковой инерции и торцевого трения в стержнях, так как эти факторы влияют на точность результатов испытаний. Точность метода Кольского можно повысить, контролируя размеры образца, уменьшая трение и применяя метод формирования импульса.

Фибробетон имеет заметно более высокую ударопрочность по сравнению с обычным бетоном. Практически все рассмотренные исследования показывают, что использование стальной фибры в бетонной смеси положительно влияет на характеристики ударопрочности. При использовании стальных волокон размер кратера и объем обломков уменьшаются, снижается количество осколков, выбрасываемых в окружающее пространство. Поведение бетона при добавлении фибры изменяется от хрупкого до пластичного, максимальные и остаточные смещения уменьшаются, улучшается устойчивость к повреждениям. Кроме того, с точки зрения предотвращения образования трещин и поглощения энергии стальные волокна проявляют себя лучше других типов волокон.

Исследования показали, что с увеличением скорости деформации растет динамическая прочность фибробетона. Использование соответствующего количества волокна приводит к значительному улучшению динамических свойств. Однако существует пороговое содержание волокон. При слишком высоком содержании волокон они скапливаются внутри бетона, увеличивая внутренние дефекты и неоднородность материала, что приводит к ухудшению динамических свойств.

В течение всего процесса разрушения бетона требуется дополнительная энергия для преодоления предела прочности волокон и их вытягивания из цементной основы. Зарождение и распространение новых трещин и вытягивание волокон предполагают

большие затраты энергии. Соответствующее количество волокон может быть использовано для формирования относительно стабильной трехмерной структуры в цементной матрице. Это улучшает общую несущую способность бетона, что приводит к увеличению энергии, необходимой для разрушения.

Влияние волокон с различными модулями упругости на свойства фибробетона зависит от синергетического эффекта различных типов волокон. Модифицированные волокна не только улучшают динамическую прочность бетона, но и повышают его ударную вязкость. Что касается формы стальных волокон, то спиралевидные волокна и волокна с крючковидными концами показали лучшие характеристики при ударной нагрузке: они уменьшают ширину раскрытия трещин и увеличивают жесткость и энергоемкость фибробетона. Фибробетон со спиралевидными волокнами из-за большей площади поверхности скрученных волокон, которая усиливает связь с бетонной матрицей, является наилучшим выбором для обеспечения ударопрочности, предельной прочности на сжатие, пластичности, сопротивляемости росту трещин и способности поглощать энергию по сравнению с другими типами стальных волокон.

Объемная доля стальной фибры играет доминирующую роль в фибробетоне. За счет увеличения объемной доли стальных волокон повышается сопротивление взрыву, сопротивление проникновению, прочность на сжатие, ударная вязкость, устойчивость к разрушению и скоростная чувствительность. Напротив, глубина и размер кратера, скалывание, объем обломков снижается. Более того, специальный фибробетон с 6% объемной долей стальных волокон в четыре раза прочнее, чем обычный фибробетон, с точки зрения прочности на изгиб и рассеивания большего количества энергии. В ряде публикаций отмечено, что взрывостойкость фибробетонных конструкций увеличивается при смешивании стальной и полипропиленовой фибры.

Механизм армирования модифицированными волокнами различной длины в фибробетоне является результатом комбинированного действия армирования короткими волокнами и армирования длинными волокнами, что ограничивает развитие трещин в двух масштабах длины.

Хотя армирование волокном является наиболее эффективным средством повышения стойкости бетона к ударам и другим динамическим нагрузкам, значительное количество проблем остается нерешенным. Во-первых, представленные в литературе данные были получены в результате различных испытаний на удар, различных методов крепления образцов и методов получения высоких скоростей деформации. Все эти параметры существенно влияют на результат. Например, копры с падающим грузом разной массы и высоты падения могут давать разные результаты. Тяжелые ударники имитируют длинные импульсы, тогда как большая высота падения моделирует короткие импульсы. Очевидно следует использовать копровую установку, которая имитирует ожидаемые в реальной жизни импульсы динамической нагрузки.

Во-вторых, одной из областей, требующих подробного изучения, является поведение фибробетона при высоких скоростях деформации. Некоторые исследования показали, что прочностные характеристики фибробетона улучшаются при большой динамической нагрузке, в то время как другие исследования показали, что увеличение пластичности и ударной вязкости, которое обычно наблюдается при статической нагрузке, отсутствует при высоких скоростях деформации [100]. Например, прочность фибробетона на сжатие увеличивается до тех пор, пока не будет достигнута

скорость деформации 50 с^{-1} . После этого не наблюдается значительного увеличения прочности на одноосное сжатие из-за нарушения сцепления между цементным камнем и стальной фиброй. Таким образом, вопрос реакции фибробетона на ударные нагрузки остается открытым. Следовательно, в этой области необходимы дальнейшие исследования.

Как видно из рассмотренных источников, образцы, использованные в исследованиях, имеют разные размеры и геометрию. Структурные изменения могут повлиять на результаты. Таким образом, необходимо организованное исследование для тщательного изучения и анализа образцов, близких друг к другу по поведению. Учитывая эти факторы, можно сделать вывод, что систематическое и всестороннее экспериментальное исследование в сочетании с подробным численным анализом необходимо для определения поведения фибробетона с точки зрения объемной доли и формы стальных волокон.

References

1. Afroughsabet V., Biolzi L., Ozbakkaloglu T. High-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Journal of Materials Science*. 2016. Vol. 51. No 14. P. 6517–6551. DOI: 10.1007/s10853-016-9917-4.
2. Buttignol T.E.T., Sousa J., Bittencourt T.N. Ultra high-performance fiber-reinforced concrete (UHPC): A review of material properties and design procedures. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. 2017. Vol. 10. No 4. P. 957–971. DOI: 10.1590/S1983-41952017000400011.
3. Li V.C., Horikoshi T., Ogawa A., Torigoe S., Saito T. Micromechanics-based durability study of polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite. *ACI Materials Journal*. 2004. Vol. 101. No 3. P. 242–248. DOI: 10.14359/13120.
4. Paul S.C., van Zijl G.P. Mechanically induced cracking behaviour in fine and coarse sand strain hardening cement based composites (SHCC) at different load levels. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2013. Vol. 11. P. 301–311. DOI: 10.3151/jact.11.301.
5. Dahake A., Charkha K. Effect of steel fibers on the strength of concrete. *Journal of Engineering, Science & Management Education*. 2016. Vol. 9(1). P. 45–51.
6. Wille K., Kim D.J., Naaman A.E. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents. *Materials and Structures*. 2011. Vol. 44. Iss. 3. P. 583–598. DOI:10.1617/S11527-010-9650-4.
7. Zheng Y., Wu X., He G., Shang Q., Xu J., Sun Y. Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete by vibratory mixing technology. *Advances in Civil Engineering*. 2018. Vol. 118. P. 9025715-1–9025715-11. DOI: 10.1155/2018/9025715.
8. Babafemi A.J., Boshoff W.P. Tensile creep of macro-synthetic fibre reinforced concrete (MSFRC) under uni-axial tensile loading. *Cement and Concrete Composites*. 2015. Vol. 55. P. 62–69. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.08.002.
9. Guerini V., Conforti A., Plizzari G., Kawashima S. Influence of steel and macro-synthetic fibers on concrete properties. *Fibers*. 2018. Vol. 6. Iss. 3. P. 47-1–47-14. DOI: 10.3390/fib6030047.
10. Sorelli L.G., Meda A., Plizzari G.A. Steel fiber concrete slabs on ground: A structural matter. *ACI Structural Journal*. 2006. Vol. 103(4). P. 551–558. DOI: 10.14359/16431.
11. Del Vecchio C., Di Ludovico M., Balsamo A., Prota A. Seismic retrofit of real beam-column joints using fiber-reinforced cement (FRC) composites. *Journal of Structural Engineering*. 2018. Vol. 144. Iss. 5. P. 04018026-1–P. 04018026-12. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001999.
12. Hashash Y.M., Hook J.J., Schmidt B., John I., Yao C. Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2001. Vol. 16. Iss. 4. P. 247–293. DOI:10.1016/S0886-7798(01)00051-7.
13. Porco F., Ruggieri S., Uva G. Seismic assessment of irregular existing building: Appraisal of the influence of compressive strength variation by means of nonlinear conventional and multimodal static analysis. *Ingegneria Sismica*. 2018. Vol. 35. Iss. 3. P. 64–86.

14. Ruggieri S., Perrone D., Leone M., Uva G., Aiello M.A. A prioritization RVS methodology for the seismic risk assessment of RC school buildings. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2020. Vol. 51. P. 101807-1–101807-27. DOI: 10.1016/j.ijdr.2020.101807.
15. Thomas R.J., Sorensen A.D. Review of strain rate effects for UHPC in tension. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 153. P. 846–856. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.168>.
16. Yu Q., Zhuang W., Shi C. Research progress on the dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete under high strain rates. *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 124. Article No 104258. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104258>.
17. Yoo D.-Y., Banthia N. Mechanical and structural behaviors of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete subjected to impact and blast. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 149. P. 416–431. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.136.
18. Yang L., Lin X., Gravina R.J. Evaluation of dynamic increase factor models for steel fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 190. P. 632–644. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.085>.
19. Zhang J., Wu Z., Yu H., Ma H., Da B. Mesoscopic modeling approach and application for steel fiber reinforced concrete under dynamic loading: A Review. *Engineering*. 2022. Vol. 16. P. 220–238. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.01.011>.
20. Bischoff P., Perry S. Compressive behaviour of concrete at high strain rates. *Materials and Structures*. 1991. Vol. 24. Iss. 6. P. 425–450. <https://doi.org/10.1007/BF02472016>.
21. Zhang H., Wang L., Bai L., Addae M., Neupane A. Research on the impact response and model of hybrid basalt-macro synthetic polypropylene fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 204. P. 303–316. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.201>.
22. Gonov M.E. Kompleksnoe issledovanie svoystv melkozernistogo betona pri dinamicheskom rastyazhenii i sreze [Comprehensive study of the properties of fine-grained concrete under dynamic tension and shear]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2020. Vol. 82. No 4. P. 442–457 (In Russian).
- Гонов М.Е. Комплексное исследование свойств мелкозернистого бетона при динамическом растяжении и срезе. *Проблемы прочности и пластичности*. 2020. Т. 82. №4. С. 442–457. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2020-82-4-442-457>.
23. Suvash C.P., Gideon P.A., Branko S. Effect of fibers on durability of concrete: A practical review. *Materials*. 2020. Vol. 13. No 20. P. 4562-1–4562-26. <https://doi.org/10.3390/ma13204562>.
24. Yoo D.-Y., Park J.-J., Kim S.-W. Fiber pullout behavior of HPRCC: Effects of matrix strength and fiber type. *Composite Structures*. 2017. Vol. 174. P. 263–276. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.064>.
25. Yoo D.-Y., Kim S., Park G.-J., Park J.-J., Kim S.-W. Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced cement composites. *Composite Structures*. 2017. Vol. 174. P. 375–388. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.069>.
26. Wu Z., Khayat K.H., Shi C. Effect of nano-SiO₂ particles and curing time on development of fiber-matrix bond properties and microstructure of ultra-high strength concrete. *Cement and Concrete Research*. 2017. Vol. 95. P. 247–256. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.031>.
27. Zegardfo B. Heat-resistant concretes containing waste carbon fibers from the sailing industry and recycled ceramic aggregates. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 16. Article No e01084. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01084>.
28. Lu S., Bai E., Xu J., Chen J. Research on electromagnetic properties and microwave deicing performance of carbon fiber modified concrete. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 286. Article No 122868. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122868>.
29. Wang Y., Hu S., Sun X. Experimental investigation on the elastic modulus and fracture properties of basalt fiber-reinforced fly ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 338. Article No 127570. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127570>.
30. Tibebe A., Mekonnen E., Kumar L., Chimdi J., Hailu H., Fikadu N. Compression and workability behavior of chopped glass fiber reinforced concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 62. Pt. 8. P. 5087–5094. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.427>.
31. Ma S., Hou D., Bao P., Wang D. Influence of alkali-resistant glass fiber on seismic

performance of precast ceramsite concrete sandwich wall panels. *Structures*. 2022. Vol. 38. P. 94–107. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.081>.

32. Devi C., Vijayan D.S., Nagalingam R., Arvandan S. A review of the implementations of glass fiber in concrete technology. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 62. Pt. 4. P. 2010–2015. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.293>.

33. Liang N., Mao J., Yan R., Liu X., Zhou X. Corrosion resistance of multiscale polypropylene fiber-reinforced concrete under sulfate attack. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 16. Article No e01065. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01065>.

34. Jeyanthi J., Revathi S. Study of light weight composite concrete incorporated with polypropylene fiber and genosphere. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 62. Pt. 6. P. 4303–4309. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.804>.

35. Shen D., Liu C., Wang M., Kang J., Li M. Effect of polyvinyl alcohol fiber on the cracking risk of high strength concrete under uniaxial restrained condition at early age. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 300. Article No 124206. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124206>.

36. Zhang Y., Aslani F. Development of fibre reinforced engineered cementitious composite using polyvinyl alcohol fibre and activated carbon powder for 3D concrete printing. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 303. Article No 124453. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124453>.

37. Farooqi M.U., Ali M. Contribution of plant fibers in improving the behavior and capacity of reinforced concrete for structural applications. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 182. P. 94–107. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.041>.

38. Bragov A.M., Petrov Yu.V., Karihaloo B.L., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Smirnov I.V. Dynamic strengths and toughness of an ultra high performance fibre reinforced concrete. *Engineering Fracture Mechanics*. 2013. Vol. 110. P. 477–488. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.12.019>.

39. Chen X., Wu S., Zhou J. Experimental and modeling study of dynamic mechanical properties of cement paste, mortar and concrete. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 47. P. 419–430. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.063>.

40. Yang L., Xie H., Zhang D., Zhang F., Lin C., Fang S. Acoustic emission characteristics and crack resistance of basalt fiber reinforced concrete under tensile load. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 312. Article 125442. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125442>.

41. Pan K., Yu R.C., Ruiz G., Zhang X., Wu Z., De La Rosa A. The propagation speed of multiple dynamic cracks in fiber-reinforced cement-based composites measured using DIC. *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 122. Article No 104140. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104140>.

42. Yang L., Qi C., Lin X., Li J., Dong X. Prediction of dynamic increase factor for steel fibre reinforced concrete using a hybrid artificial intelligence model. *Engineering Structures*. 2019. Vol. 189. P. 309–318. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.105>.

43. *ACI Committee Report 544.3R-08*. Guide for specifying, proportioning and production of fibre reinforced concrete. American Concrete Institute. 2008. 16 p.

44. Redaelli D., Muttoni A. Tensile behaviour of reinforced ultra-high performance fiber reinforced concrete elements. *Concrete Structures – Stimulators of Development: Symposium Dubrovnik 2007*. Dubrovnik, Croatia, 20–23 May 2007. P. 267–274.

45. Song P., Hwang S. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2004. Vol. 18. Iss. 9. P. 669–673. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2004.04.027.

46. Sharma A., Ožbolt J. Influence of high loading rates on behavior of reinforced concrete beams with different aspect ratios – A numerical study. *Engineering Structures*. 2014. Vol. 79. P. 297–308. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.08.025.

47. Stolz A., Fischer K., Roller C., Hauser S. Dynamic bearing capacity of ductile concrete plates under blast loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2014. Vol. 69. P. 25–38. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.02.008.

48. Thiagarajan G., Kadambi A.V., Robert S., Johnson C.F. Experimental and finite element

analysis of doubly reinforced concrete slabs subjected to blast loads. *International Journal of Impact Engineering*. 2015. Vol. 75. P. 162–173. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.07.018.

49. Qasrawi Y., Heffernan P.J., Fam A. Dynamic behaviour of concrete filled FRP tubes subjected to impact loading. *Engineering Structures*. 2015. Vol. 100. P. 212–225. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.06.012.

50. Wu C., Oehlers D.J., Rebentrost M., Leach J., Whittaker A.S. Blast testing of ultra-high performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs. *Engineering Structures*. 2009. Vol. 31. Iss. 9. P. 2060–2069. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.03.020.

51. Almusallam T., Al-Salloum Y., Alsayed S., Iqbal R., Abbas H. Effect of CFRP strengthening on the response of RC slabs to hard projectile impact. *Nuclear Engineering and Design*. 2015. Vol. 286. P. 211–226. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.02.017>.

52. Ramadoss P. Studies on high performance steel fiber reinforced concrete under static and impact loads. *A Thesis Doctor of Philosophy*. 2007. 212 p.

53. Stoller M.E., Zezulová E. The field testing of high performance fiber reinforced concrete slabs under the TNT load explosion together with the analytical solution and the numerical modelling of those tests results. *International Conference on Military Technologies 2015 – ICMT 2015*. Brno, Czech Republic, 19–21 May 2015. P. 211–218 DOI: 10.1109/MILTECHS.2015.7153666.

54. Sovják R., Vavřiník T., Máca P., Zatloukal J., Konvalinka P., Song Y. Experimental investigation of ultra-high performance fiber reinforced concrete slabs subjected to deformable projectile impact. *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 65. P. 120–125. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.09.021.

55. Yi N.-H., Kim J.-H.J., Han T.-S., Cho Y.-G., Lee J.H. Blast-resistant characteristics of ultra-high strength concrete and reactive powder concrete. *Construction and Building Material*. 2012. Vol. 28. Iss. 1. P. 694–707. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.014>.

56. Maranan G., Manalo A., Benmokrane B., Karunasena W., Mendis P. Evaluation of the flexural strength and serviceability of geopolymer concrete beams reinforced with glass-fibre-reinforced polymer (GFRP) bars. *Engineering Structures*. 2015. Vol. 101. P. 529–541. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.08.003.

57. Maranan G., Manalo A., Benmokrane B., Karunasena W., Mendis P. Behavior of concentrically loaded geopolymer-concrete circular columns reinforced longitudinally and transversely with GFRP bars. *Engineering Structures*. 2016. Vol. 117. P. 422–436. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.03.036.

58. Bayandin Y.V., Bilalov D.A., Uvarov S.V. Verification of wide-range constitutive relations for elastic-viscoplastic materials using Taylor–Hopkinson test. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2021. Vol. 62. Iss. 7. P. 1267–1276. DOI: 10.1134/S0021894421070026.

59. Tanapornraweekit G., Haritos N., Mendis P. Behavior of FRP-RC slabs under multiple independent air blasts. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2011. Vol. 25. Iss. 5. P. 433–440. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000191.

60. Xu T., Zhao G., Zhu W., Chen C., Yuan L. Mesoscale modeling of spallation failure in fiber-reinforced concrete slab due to impact loading. *International Journal of Geomechanics*. 2016. Vol. 16. Iss. 1. P. B4015001-1–B4015001-11. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000496.

61. Gonov M.E. Mekhanicheskie svoystva fibrobetonov pri dinamicheskom szhatii [Mechanical properties of fiber concrete under dynamic compression]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2022. Vol. 84. No 1. P. 131–148 (In Russian).

Гонов М.Е. Механические свойства фибробетонов при динамическом сжатии. *Проблемы прочности и пластичности*. 2022. Т. 84. №1. С. 130–148. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2022-84-1-130-148>.

62. Chen M., Si H., Fan X., Xuan Y., Zhang M. Dynamic compressive behaviour of recycled tyre steel fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 316. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125896>.

63. Liu G.-J., Bai E.-L., Xu J.-Y., Yang N., Wang T.-j. Dynamic compressive mechanical properties of carbon fiber-reinforced polymer concrete with different polymer-cement ratios at high strain rates. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 261. P. 119995-1–119995-11. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119995.

64. Li N., Jin Z., Long G., Chen L., Fu Q., Yu Y. et al. Impact resistance of steel fiber-

- reinforced self-compacting concrete (SCC) at high strain rates. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 38. Article No 102212. DOI: 10.1016/j.job.2021.102212.
65. Wu Z., Shi C., He W., Wang D. Static and dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements. *Cement and Concrete Composites*. 2017. Vol. 79. P. 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.010>.
66. Xia W., Xu J., Nie L., Wang Z., Huang Z., Yao A. Dynamic compressive mechanical properties of carbon nanofibers reinforced concrete under impact load. *Materials Reports*. 2021. Vol. 35. Iss. 22. P. 22063–22071. <https://doi.org/10.11896/cldb.20100229>.
67. Hao Y., Hao H. Dynamic compressive behaviour of spiral steel fibre reinforced concrete in split Hopkinson pressure bar tests. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 48. P. 521–532. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.022>.
68. Huang Z., Sui L., Wang F., Du S., Zhou Y., Ye J. Dynamic compressive behavior of a novel ultra-lightweight cement composite incorporated with rubber powder. *Composite Structures*. 2020. Vol. 244. Article No 112300. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112300>.
69. Xie L., Li Q., Xu S. Multiple impact compressive properties and constitutive model of ultra-high toughness cementitious composites. *Engineering Mechanics*. 2021. Vol. 38. Iss. 12. P. 158–171. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.11.0860.
70. Luo X., Xu J.-y., Bai E.-l., Li W. Research on the dynamic compressive test of highly fluidized geopolymers concrete. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 48. P. 166–172. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.035>.
71. Zhang H., Gao Y., Li F., Lu F. Experimental study on dynamic properties and constitutive model of polypropylene fiber concrete under high strain rate. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2013. Vol. 17. Iss. 1. P. s294–s303. <https://doi.org/10.1080/19648189.2013.834601>.
72. Gao Y., Xu J., Bai E., Luo X., Zhu J., Nie L. Static and dynamic mechanical properties of high early strength alkali activated slag concrete. *Ceramics International*. 2015. Vol. 41. Iss. 10. Pt A. P. 12901–12909. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.06.131>.
73. Chen L., Zhang X., Liu G. Analysis of dynamic mechanical properties of sprayed fiber-reinforced concrete based on the energy conversion principle. *Construction and Building Materials*. 2020. Article No 119167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119167>.
74. Kseniia R., Zhou W. Dynamic compressive response of high-performance fiber-reinforced cement composites. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 249. Article No 118738. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118738>.
75. Maalej M., Quek S.T., Zhang J. Behavior of hybrid-fiber engineered cementitious composites subjected to dynamic tensile loading and projectile impact. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2005. Vol. 17. Iss. 2. P. 143–152. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2005\)17:2\(143\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:2(143)).
76. Song P.S., Wu J.C., Hwang S., Sheu B.C. Statistical analysis of impact strength and strength reliability of steel-polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2005. Vol. 19. Iss. 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.05.002>.
77. Zhang J., Maalej M., Quek S.T. Performance of hybrid-fiber ECC blast/shelter panels subjected to drop weight impact. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2007. Vol. 19. Iss. 10. P. 855–863. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:10\(855\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:10(855)).
78. Brühwiler E., Denarié E. Rehabilitation and strengthening of concrete structures using ultra-high performance fibre reinforced concrete. *Structural Engineering International*. 2013. Vol. 23. Iss. 4. P. 450–457. DOI: 10.2749/101686613X13627347100437.
79. Bragov A.M., Petrov Yu.V., Karihaloo B.L., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Smirnov I.V. Dynamic strengths and toughness of an ultra high performance fibre reinforced concrete. *Engineering Fracture Mechanics*. 2013. Vol. 110. P. 477–488. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.12.019>.
80. Curosu I., Liebscher M., Alsous G., Muja E., Li H., Drechsler A., Frenzel R., Synytska A., Mechtcherine V. Tailoring the crack-bridging behavior of strain-hardening cement-based composites (SHCC) by chemical surface modification of poly (vinyl alcohol) (PVA) fibers. *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 114. P. 103722-1–103722-12. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103722>.

81. Tran N.T., Tran T.K., Kim D.J. High rate response of ultra-high-performance fiber-reinforced concretes under direct tension. *Cement and Concrete Research*. 2015. Vol. 69. P. 72–87. DOI: 10.1016/j.cemconres.2014.12.008.
82. Yoo D.-Y., Shin H.-O., Yang J.-M., Yoon Y.-S. Material and bond properties of ultra high performance fiber reinforced concrete with micro steel fibers. *Composites Part B: Engineering*. 2014. Vol. 58. P. 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.081>.
83. Chen M., Zhong H., Wang H., Zhang M. Behaviour of recycled tyre polymer fibre reinforced concrete under dynamic splitting tension. *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 114. Article No 103764. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103764>.
84. Li X., Zhang Y., Shi C., Chen X. Experimental and numerical study on tensile strength and failure pattern of high performance steel fiber reinforced concrete under dynamic splitting tension. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 259. Article No 119796. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119796>.
85. Yao Z., Wang C., Xue W., Zhang P., Fang Y. Experimental study on the dynamic mechanical properties of high-performance hybrid fiber-reinforced concrete of mine shaft lining. *Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 14. P. 888–900. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.015>.
86. Chandrathilaka E.R.K., Baduge S.K., Mendis P., Thilakarathna P.S.M. Structural applications of synthetic fibre reinforced cementitious composites: A review on material properties, fire behaviour, durability and structural performance. *Structures*. 2021. Vol. 34. P. 550–574. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.090>.
87. Huang L., Su L., Xie J., Lu Z., Li P., Hu R. et al. Dynamic splitting behaviour of ultra-high-performance concrete confined with carbon-fibre-reinforced polymer. *Composite Structures*. 2022. Vol. 284. Article No 115155. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115155>.
88. Xie H., Yang L., Zhu H., Zhang Q., Deng X., Wei P. et al. Energy dissipation and fractal characteristics of basalt fiber reinforced concrete under impact loading. *Structures*. 2022. Vol. 46. P. 654–663. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.10.086>.
89. Xu T., Zhu W., Zhao G., Lin Y. Dynamic spallation in fiber reinforced concrete under impact loading. *Geo-Hubei 2014 International Conference on Sustainable Civil Infrastructure*. Yichang Hubei, China, 20–22 Jul. 2014. P. 17–24.
90. Yoon Y., Lee J., Jang I., Hwang D. Improved impact resistance of layered steel fiber reinforced concrete beam. *Proceedings of the 13th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2013)*. Sapporo, Japan, 11–13 Sept. 2013.
91. Qin Y., Xu D., Zhang S., Fan X. Dynamic behavior of carbon nanotubes and basalt fiber reinforced coral sand cement mortar at high strain rates. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 340. Article No 127396. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127396>.
92. Xie H., Yang L., Zhang Q., Huang C., Chen M., Zhao K. Research on energy dissipation and damage evolution of dynamic splitting failure of basalt fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 330. Article No 127292. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127292>.
93. Yoo D.-Y., Banthia N. Impact resistance of fiber-reinforced concrete – A review. *Cement and Concrete Composites*. 2019. Vol. 104. Article No 103389 <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103389>.
94. Wang S., Zhang M.-H., Quek S.T. Mechanical behavior of fiber-reinforced high-strength concrete subjected to high strain-rate compressive loading. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 31. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.083>.
95. Zhang W.H., Zhang Y.S. Research on the static and dynamic compressive properties of high performance cementitious composite (HPCC) containing coarse aggregate. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 15. Iss. 3. P. 711–720. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.12.006>.
96. Kotsovos M.D., Pavlovic M.N. Discussion: Impact behavior of plain concrete loaded in uniaxial compression. *Journal of Engineering Mechanics*. 1997. Vol. 123. Iss. 7. P. 763–763. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123:7\(763\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:7(763)).
97. Su Y., Li J., Wu C., Wu P., Li Z.-X. Influences of nano-particles on dynamic strength of ultra-high performance concrete. *Composites Part B: Engineering*. 2016. Vol. 91. P. 595–609. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.01.044>.

98. Chin W.J., Kim Y.J., Cho J.R., Park J.S. Dynamic characteristics evaluation of innovative UHPC pedestrian cable stayed bridge. *Engineering*. 2012. Vol. 4. Iss. 12. P. 869–876. DOI: 10.4236/eng.2012.412110.

99. Zhou X.Q., Kuznetsov V.A., Hao H., Waschl J. Numerical prediction of concrete slab response to blast loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2008. Vol. 35. Iss. 10. P. 1186–1200. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.01.004>.

100. Lok T.S., Zhao P.J. Impact response of steel fiber-reinforced concrete using a split Hopkinson pressure bar. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2004. Vol. 16. Iss. 1. P. 54–59. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:1(54).

REVIEW OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF FIBER CONCRETE UNDER DYNAMIC TENSION AND COMPRESSION*

Gonov M.E.¹, Makarov N.S.², Igumnova O.L.²,
Sabaeva T.A.², Denisova N.A.²

¹*Research Institute for Mechanics, National Research Lobachevsky State University
of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

²*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

briz_2007@list.ru

Received by the Editor 2022/11/22

This article is a review of the mechanical properties of fiber-reinforced concrete at high strain rates under tensile and compressive stresses. Fibre-reinforced concrete is widely used in the construction of protective structures, in tunnels, engineering structures in seismic areas, airport runways, river and marine engineering structures and is an important substitute for classic concrete.

The review covers the following aspects: advantages and disadvantages of various test methods used to determine the dynamic properties of fiber-reinforced concrete; studies of the dynamic characteristics of fiber-reinforced concrete in compression and tension, including their strength, deformation capacity and ability to absorb energy. The purpose of this review is to expand fundamental knowledge about the dynamic properties of fiber-reinforced concrete and to promote further research on its physical and mechanical characteristics and applications for increasing the strength of brittle materials.

At the beginning of the review, the most commonly used test setups and methods for dynamic testing are considered. The Kolsky method is most widely used to determine properties in dynamic compression, tension, and tensile splitting at high strain rates. Further, the main part of the review considers the mechanical properties of fiber-reinforced concrete under dynamic compression and tension, including strength, impact strength, and the ability to absorb energy. Studies have shown that with an increase in the rate of deformation, the dynamic strength of fiber-reinforced concrete increases. The use of an appropriate amount of fiber leads to a significant improvement in dynamic properties. However, there is a threshold fiber content. In conclusion, by summarizing and comparing previous studies, the advantages and disadvantages of existing studies are emphasized, and suggestions for further research are made.

Keywords: fiber-reinforced concrete, dynamic properties, Kolsky method, dynamic compression, dynamic tension.

*The research was supported by Russian Science Foundation (project No 22-19-00138).