

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2022-84-1-130-148

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФИБРОБЕТОНОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ СЖАТИИ*

© 2022 г.

Гонов М.Е.

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

briz_2007@list.ru

Поступила в редакцию 06.12.2021

Приведены результаты экспериментального исследования высокоскоростного деформирования и разрушения четырех видов бетона при динамическом одноосном сжатии. Представлен обзор экспериментальных исследований отечественных и зарубежных авторов динамических свойств фибробетонов. Мировая практика подтверждает целесообразность введения металлической фибры в бетон с целью повышения его прочностных динамических свойств, однако комбинация стальной и полимерной фибры до конца не изучена и представляет собой актуальный интерес.

При высокоскоростном деформировании испытывался мелкозернистый бетон, сталефибробетон, полифибробетон и комбинированный фибробетон. По результатам исследования проведены статические и динамические испытания. Испытания на динамическое сжатие проводились с помощью метода Кольского при скоростях деформации от 10^2 до 10^3 с⁻¹. Статические испытания проводились на установке с гидравлическим приводом. Для визуализации процесса динамического деформирования и разрушения использовалась высокоскоростная камера FASTCAM Mini UX100. Представлены составы исследуемых материалов, параметры испытаний, а также сравнительный анализ полученных данных. Введение упрочняющей фибры в исходный мелкозернистый бетон повысило динамическую прочность материала. При статических испытаниях бетон со стальной фиброй и бетон с комбинацией полимерной и стальной фибры показали близкие значения по максимальной прочности. Наибольшую прочность при динамическом одноосном сжатии показал фибробетон со стальной фиброй. Полученные зависимости демонстрируют, что достигнутые в экспериментах максимальные разрушающие напряжения и соответствующие им предельные деформации растут линейно с ростом скорости деформации, а время до начала разрушения снижается по степенному закону.

Ключевые слова: динамическая прочность, напряжение, деформация, скорость деформации, бетон, фибробетон, динамические испытания, метод Кольского, эксперимент.

*Литературный обзор по исследованиям динамических свойств фибробетонов выполнен при поддержке РФФ (грант №22-19-00138). Экспериментальное исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант №19-38-90225).

Введение

Обычный бетон обладает относительно низкой прочностью на растяжение и низкой пластичностью, поэтому он подвержен растрескиванию. Образование трещин приводит к раннему началу процессов разрушения бетона или железобетона. В статьях [1–5] показано, что добавление стальных или неметаллических волокон увеличивает прочность на разрыв и пластичность фибробетона. За последнее время были разработаны новые типы фибробетона с различными улучшенными свойствами [6–9]. Используются волокна различного поперечного сечения (плоские, круглые, прямоугольные и др.). Как правило, в фибробетонах применяют металлические, стеклянные, синтетические и натуральные волокна. По длине различают микро-волокна 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.

На физико-механические свойства фибробетонов влияют форма, объемная доля и геометрия фиброволокна. Влияние этих факторов исследовано различными авторами в [10–19].

Существует множество типов фибробетона со стальной фиброй, среди которых выделяют четыре основных типа в зависимости от объемной доли волокна и исходных прочностных свойств бетона. Первый тип – фибробетон с прерывистыми дискретными стальными волокнами [20]. Второй тип – высокопрочный фибробетон, который обычно определяется как высокопрочный бетон с прочностью на сжатие свыше 40 МПа с добавлением коротких случайно распределенных волокон с объемной долей в 2,0% или более. Третий тип – специальный фибробетон – это особый тип высокопрочного бетона, армированного фиброй с высокой прочностью (150–400 МПа) и большой объемной долей стальной фибры (5–10%) [21, 22]. Четвертый тип – сверхвысокопрочный фибробетон – это новый класс материалов, сочетающих в себе очень прочную и плотную вяжущую цементную основу с высоким содержанием волокна.

Следует отметить, что вопрос о наилучших механических свойствах фибробетона со стальными или комбинированными волокнами при динамическом сжатии остается по-прежнему открытым, поэтому исследование прочностных характеристик фибробетона с различными видами фибры при высокоскоростном деформировании и разрушении является актуальной задачей. Решению этой задачи посвящена настоящая статья.

Методика испытаний

Высокоскоростные испытания при сжатии в условиях одномерного напряженного состояния производились на экспериментальной установке SHPB-20 [23–25], схема которой представлена на рис. 1. Испытания проводились на образцах диаметром 20 мм и длиной 10 мм. Мерные стержни, как нагружающий, так и опорный, а также цилиндрический ударник изготовлены из дюралюминиевого сплава Д16Т с модулем упругости $0,71 \cdot 10^5$ МПа. Амплитуда нагружающей волны варьировалась за счет изменения скорости ударника. Режимы нагружения были подобраны таким образом, чтобы наблюдался постепенный рост скорости деформаций и скорости нагружения.

При динамических испытаниях для визуализации процессов деформирования и разрушения использовалась высокоскоростная цифровая камера FASTCAM Mini UX100. На основе покадровой фотосъемки проводился анализ времени и характера разрушения образцов.

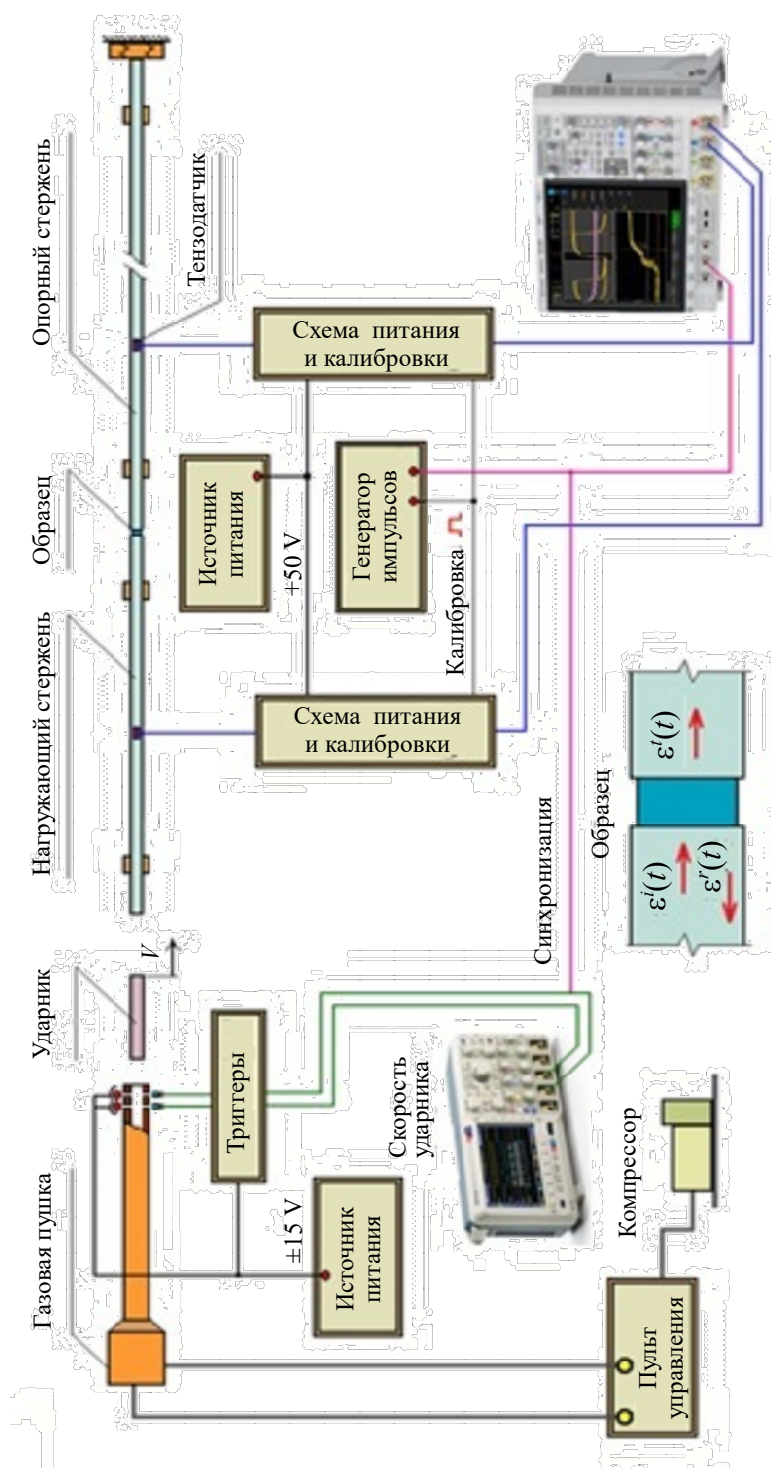


Рис. 1.Схема установки для испытаний при сжатии в условии одноосного напряженного состояния

Характеристики испытываемых материалов

Было изготовлено три вида фибробетона, отличающихся материалом армирующей фибры: фибробетон с полимерной фиброй (полифибробетон – ПФБ) с объемной долей полипропиленового волокна 1,5%; фибробетон со стальной фиброй (сталефибробетон – СФБ) с объемной долей стального волокна 1,5%; фибробетон с комбинацией полимерной и стальной фибры (комбинированный фибробетон – КФБ) с объемной долей полипропиленового (0,75%) и стального (0,75%) волокна. Также приведен состав исходного мелкозернистого бетона (МЗБ) для сравнительного анализа влияния армирующей фибры на механические свойства исследуемых материалов.

Полипропиленовая фибра (рис. 2), изготовленная компанией Poliarm, представляет собой структурные синтетические макроволокна длиной 25 мм – отдельные жесткие волокна синусоидально-волнистой формы из ориентированного первичного полипропилена, обработанные специальным составом, улучшающим адгезию с бетонным раствором.



Рис. 2. Полипропиленовая фибра Poliarm и стальная фибра БМЗ

Технические характеристики полипропиленовой фибры представлены в таблице 1.

Таблица 1

Технические характеристики полипропиленовой фибры

№	Характеристика	Показатель
1	Длина	от 25 до 55 мм
2	Материал	первичный полипропилен 100%
3	Удельный вес	0,91 кг/м ³
4	Модуль Юнга	3500 Н/мм ²
5	Прочность на разрыв	360–560 Н/мм ²
6	Температура размягчения	156 °С
7	Цвет	прозрачно-белый
8	Химическая устойчивость	к кислотам, щелочам и растворителям

Изготовителем стальной фибры является Белорусский металлургический завод (БМЗ). Стальную фибру изготавливают из высокоуглеродистой стальной проволоки по ГОСТ 9389 с временным сопротивлением разрыву не менее 1000 Н/мм². Для изготовления сталефибробетона применялась фибра волнового профиля длиной 15 мм, диаметром 0,3 мм (см. рис. 2).

Динамические испытания на сжатие проводились на установке РСГ-20-2. Состав фибробетонов представлен в таблице 2.

Таблица 2

Состав фибробетонов

№	Материал	Расход на 1 м ³ (кг)			
		Без фибры	Полимерная фибра	Стальная фибра	Комбинированная фибра
1	Цемент (марка D500)	480	480	480	480
2	Щебень (модуль 1–3 мм)	1250	1000	1000	1000
3	Песок средней крупности	390	600	600	600
4	Суперпластификатор	2,4	3,0	3,0	3,0
5	Вода	205	200	200	200
6	Полипропиленовая фибра Poliarm 25 мм	–	14,0	–	7,0
7	Стальная волнистая фибра БМЗ 15 мм	–	–	120	60

Все образцы для динамических испытаний изготавливались методом высверливания с помощью алмазной коронки из заранее отлитых бетонных заготовок.

Результаты статических испытаний

Статические испытания на одноосное сжатие состояли из 3-4 экспериментов для каждого материала. Цилиндрические образцы для статических испытаний длиной и диаметром 20 мм высверливались из бетонных заготовок. Испытания проводились до стадии разрушения образца при постоянной скорости деформации $3 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ на испытательной установке Z100 Zwick-Roell. Осредненные результаты испытаний в виде диаграмм деформирования показаны на рис. 3 и сведены в таблицу 3.

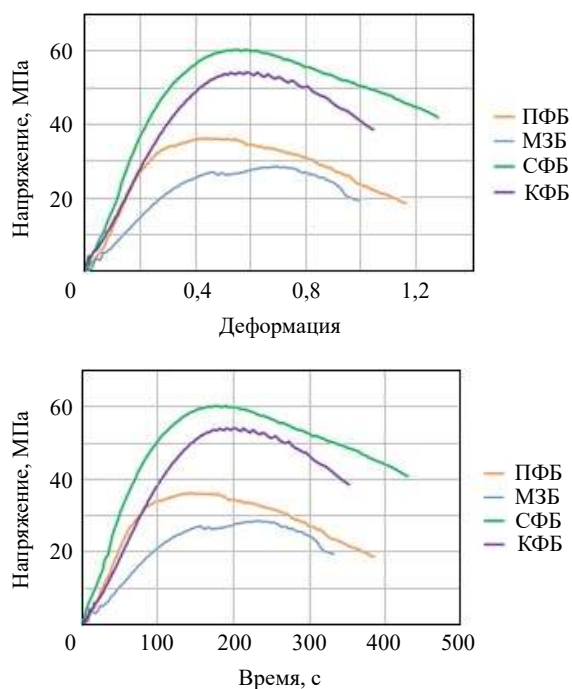


Рис. 3. Результаты статических испытаний на сжатие

Таблица 3

Результаты статических испытаний

№	Материал	Максимальные разрушающие напряжения, МПа	Предельная деформация, %
1	Мелкозернистый бетон	28,65	0,7
2	Полимерный фибробетон	36,28	0,5
3	Стальной фибробетон	60,38	0,6
4	Комбинированный фибробетон	54,14	0,6

Таким образом статические испытания показали, что наиболее прочными являются образцы со стальной и комбинированной фиброй.

Результаты динамических испытаний на одноосное сжатие

Проведенный цикл динамических испытаний мелкозернистого бетона (МЗБ) состоял из 4 скоростных режимов нагружения. Параметры испытаний приведены в таблице 4. Перед началом испытаний образцы были отсортированы, измерены и пронумерованы. Скорости деформации находились в пределах от 100 до 1000 с⁻¹.

Представлены диаграммы испытаний бетонных образцов для каждого отдельного режима, на которых сплошными линиями показаны зависимости напряжения от времени ($\sigma \sim t$) или напряжения от деформации ($\sigma \sim \varepsilon$), штриховыми линиями показана зависимость скорости деформации от времени ($\dot{\varepsilon} \sim t$) или скорости деформации от деформации ($\dot{\varepsilon} \sim \varepsilon$).

Для режима №1 средняя скорость ударника равна 10 м/с. Средняя динамическая прочность на сжатие порядка 33 МПа, средняя скорость деформации составила величину порядка 150 с⁻¹. В этом режиме образцы сохранили целостность в первом нагружающем цикле, что подтверждает упругая зона разгрузки на диаграмме деформирования. В режиме №2 средняя скорость ударника была равна 16 м/с, средняя динамическая прочность на сжатие при этом равнялась 46 МПа при средних скоростях деформации около 200 с⁻¹. В режиме №3 средняя скорость ударника была 21,0 м/с, средняя динамическая прочность на сжатие составила 57 МПа при средних скоростях деформации порядка 250 с⁻¹. В режиме №4 средняя скорость ударника составила 29 м/с, средняя динамическая прочность на сжатие порядка 69 МПа при средних скоростях деформации около 820 с⁻¹. На рис. 4 приведены осредненные диаграммы деформирования с историей изменения скорости деформации.

На диаграммах в осях $\sigma \sim \varepsilon$ на начальном участке нагружения рост напряжения и деформаций происходит по закону, близкому к линейному, а при дальнейшей деформации, при достижении предельных значений напряжений, бетон интенсивно разрушается (в режимах 2, 3, 4), что сопровождается снижением напряжений и ростом деформаций. Испытания на динамическое сжатие проводились с целью определения влияния изменения скорости деформации на диаграмму деформирования и прочностные характеристики материала (рис. 5). Коэффициент динамического упрочнения (КДУ), определяемый как отношение динамической прочности к статической, находился в пределах от 1,0 до 2,5. Среднее значение КДУ в полученном диапазоне скоростей деформации $\sim 100\text{--}1000$ с⁻¹ равно 1,7.

Таблица 4

Параметры испытаний МЗБ при динамическом сжатии

Режим/ код эксперим.	Параметры нагружения				Параметры образца				Результаты эксперимента				КДУ
	Длина ударника, мм	Материал ударника	Давление КВД, атм.	Скорость ударника, м/с	D, мм	S, мм ²	L, мм	Максим. напряж., МПа	Предвар. деформ. %	Скорость деформ., с ⁻¹	Время жизни		
											Фото-	съемка	
с679-01	250	Дюраль	0,5	11,2	18,35	264,46	10,30	29,99	1,6	196,0	106,2	–	1,0
с679-02	250	Дюраль	0,5	9,8	18,45	267,35	10,40	29,37	1,1	113,0	128,0	–	1,0
с679-03	250	Дюраль	0,5	10,1	18,45	267,35	10,40	33,44	1,2	143,3	107,6	–	1,2
с679-04	250	Дюраль	0,5	9,0	18,7	274,65	10,65	35,85	0,7	115,5	109,4	–	1,2
с679-05	250	Дюраль	0,5	12,0	18,6	271,72	10,50	35,03	1,4	166,7	111,6	–	1,2
с679-06	250	Дюраль	0,75	16,6	18,65	273,18	10,70	51,60	1,3	111,3	153,3	–	1,8
с679-07	250	Дюраль	0,75	16,5	18,55	270,26	10,65	50,03	1,5	182,9	112,9	–	1,7
с679-08	250	Дюраль	0,75	16,1	18,5	268,80	10,80	45,10	2,2	278,7	110,1	–	1,6
с679-09	250	Дюраль	0,75	15,7	18,3	263,02	10,60	46,10	1,9	196,4	124,8	–	1,6
с679-10	250	Дюраль	0,75	14,3	18,45	267,35	10,40	41,23	1,6	200,7	105,6	–	1,4
с679-11	250	Дюраль	0,75	16,0	18,5	268,80	10,65	44,38	1,8	222,5	108,8	109	1,5
с679-12	250	Дюраль	0,75	14,0	18,4	265,91	10,20	45,77	1,5	152,6	126,4	125	1,6
с679-13	250	Дюраль	1,5	20,3	18,3	263,02	10,15	51,19	2,0	324,5	104,5	90	1,8
с679-14	250	Дюраль	1,5	21,3	18,45	267,35	10,75	55,11	1,2	202,8	87,2	90	1,9
с679-15	250	Дюраль	1,5	20,2	18,4	265,91	10,70	53,92	1,7	246,7	97,7	–	1,9
с679-16	250	Дюраль	1,5	21,1	18,78	277,00	10,81	64,78	1,1	196,4	114,8	–	2,2
с679-17	250	Дюраль	1,5	21,5	18,75	276,12	10,50	57,71	1,5	307,9	86,0	80	2,0
с679-19	250	Дюраль	3	27,9	18,31	263,31	10,75	66,90	1,9	778,8	40,0	40	2,3
с679-20	250	Дюраль	3	29,9	18,76	276,41	10,65	75,82	1,5	731,2	34,8	40	2,6
с679-21	250	Дюраль	3	30,0	18,23	261,01	10,64	61,93	2,1	961,8	43,5	40	2,1
с679-22	250	Дюраль	3	29,4	18,78	277,00	10,51	71,08	1,7	817,8	36,2	40	2,5

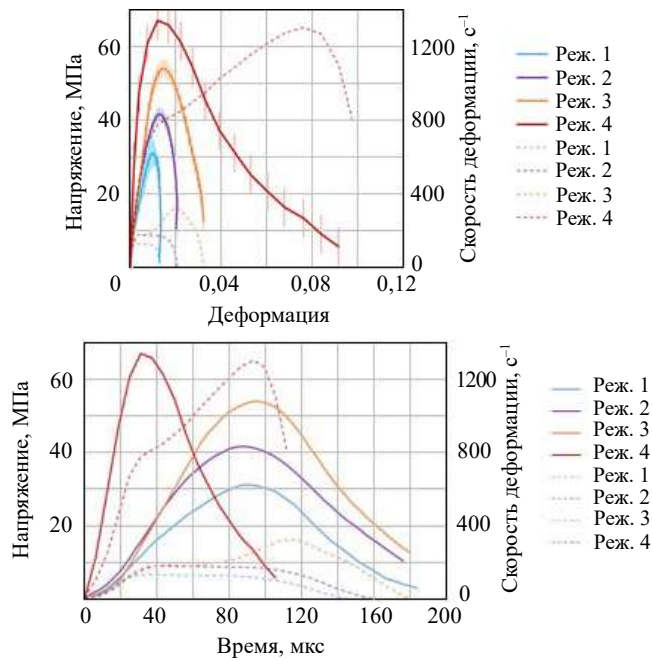


Рис. 4. Средненные диаграммы при сжатии МЗБ для всех режимов

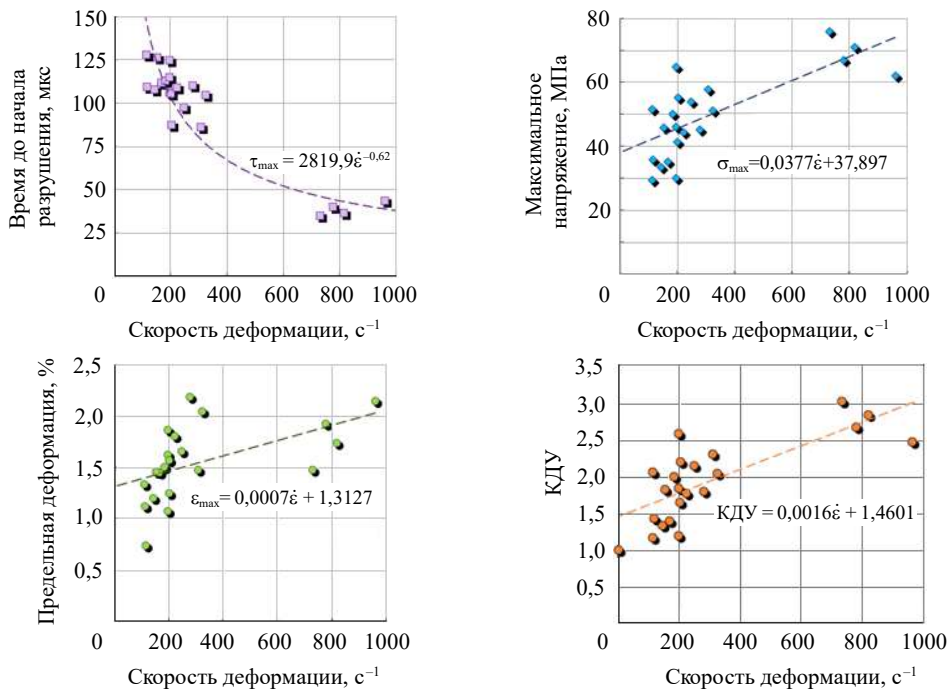


Рис. 5. Влияние скорости деформации на механические свойства МЗБ при динамическом сжатии

Цикл динамических испытаний полифибробетона (ПФБ) состоял из 3 скоростных режимов и в сумме из 17 испытательных выстрелов. Скорости деформации находились в пределах от 200 до 900 с⁻¹. Параметры испытаний приведены в таблице 5.

Таблица 5

Параметры испытаний ИФБ при динамическом сжатии

Режим/ код эксперим.	Параметры нагружения					Параметры образца					Результаты эксперимента				
	Длина ударника, мм	Материал ударника	Давление КВД, атм.	Скорость ударника, м/с	Скорость деформации, м/с	D, мм	S, мм ²	L, мм	Максим. напряжен., МПа	Предвар. деформ., %	Скорость деформ., с ⁻¹	Время жизни		КДУ	
												Диаграмма	Фото-съемка		
1	с680-01	250	Дюраль	1	16,23	18,77	276,71	10,98	54,21	1,6	218,8	105	–	1,5	
	с680-02	250	Дюраль	1	16,67	18,67	273,77	10,97	51,86	1,7	240,3	101	–	1,4	
	с680-03	250	Дюраль	1	16,37	18,74	275,82	10,89	49,71	1,8	223,7	110	110	1,4	
	с680-04	250	Дюраль	1	16,46	18,59	271,42	10,85	47,34	1,8	215,4	108	–	1,3	
	с680-05	250	Дюраль	1	17,44	18,76	276,41	10,94	55,41	1,9	215,4	112	110	1,5	
2	с680-06	250	Дюраль	2	23,59	18,75	276,12	10,84	55,29	1,7	279,5	88	94	1,5	
	с680-07	250	Дюраль	2	24,24	18,68	274,06	10,97	57,05	1,8	303,7	96	100	1,6	
	с680-08	250	Дюраль	2	24,38	18,60	271,72	10,78	55,60	1,4	266,0	84	90	1,5	
	с680-09	250	Дюраль	2	23,20	18,68	274,06	10,97	58,31	1,8	263,5	88	90	1,6	
	с680-10	250	Дюраль	2	23,89	18,66	273,47	10,95	59,25	1,3	227,0	81	90	1,6	
	с680-11	250	Дюраль	2	23,42	18,67	273,77	11,08	54,79	1,5	227,7	91	80	1,5	
3	с680-12	250	Дюраль	4	34,04	18,76	276,41	10,82	83,08	1,5	667,1	40	40	2,3	
	с680-13	250	Дюраль	4	33,87	18,57	270,84	10,98	68,18	1,8	894,7	40	40	1,9	
	с680-14	250	Дюраль	4	32,91	18,71	274,94	10,99	70,83	1,6	649,8	43	50	2,0	
	с680-15	250	Дюраль	4	31,02	18,58	271,13	10,52	72,15	2,0	831,3	43	50	2,0	
	с680-16	250	Дюраль	4	34,35	18,75	276,12	10,75	74,76	1,7	810,7	37	40	2,1	
с680-17	250	Дюраль	4	33,71	18,70	274,65	10,64	78,09	1,5	784,5	34	30	2,2		

В режиме №1 средняя скорость ударника равна 17 м/с. Средняя динамическая прочность на сжатие составила 52 МПа при средних скоростях деформации около 220 с^{-1} . В режиме №2 средняя скорость ударника равна 24 м/с, средняя динамическая прочность на сжатие составила 57 МПа при средних скоростях деформации около 260 с^{-1} . В режиме №3 средняя скорость ударника 33 м/с, средняя динамическая прочность на сжатие равна 75 МПа при средних скоростях деформации порядка 770 с^{-1} . На рис. 6 приведены осредненные диаграммы деформирования с хронологией изменения скорости деформации.

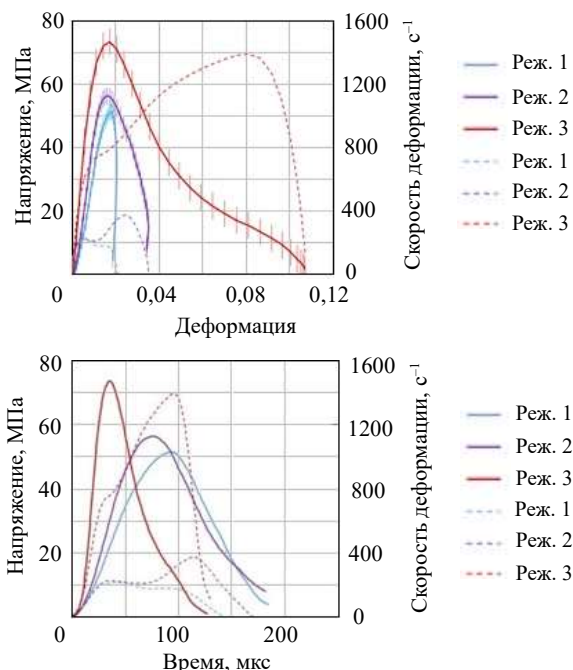


Рис. 6. Осредненные диаграммы при сжатии ПФБ для всех режимов

Зависимости предельных прочностных и деформационных характеристик к КДУ от скорости деформации приведены на рис. 7. Среднее значение КДУ в полученном диапазоне скоростей деформации $\sim 200\text{--}900 \text{ с}^{-1}$ равно 1,7. Полученное время до начала разрушения уменьшается в зависимости от скорости деформации по нелинейному закону. Предельные деформации в пределах разброса экспериментальных данных можно описать прямой горизонтальной линией, что свидетельствует об отсутствии влияния скорости деформации на предельную деформацию до разрушения.

Проведенный цикл динамических испытаний СФБ состоял из 3 скоростных режимов и из 14 испытательных выстрелов. Скорости деформации находились в пределах от 180 до 720 с^{-1} . Параметры испытаний приведены в таблице 6.

В режиме №1 средняя скорость ударника равна 16 м/с. Средняя динамическая прочность на сжатие составила порядка 60 МПа при средних скоростях деформации около 180 с^{-1} . В режиме №2 средняя скорость ударника равна 24 м/с, средняя динамическая прочность на сжатие составила 85 МПа при средних скоростях деформации около 250 с^{-1} . В режиме №3 средняя скорость ударника 34 м/с, средняя динамическая прочность на сжатие составила 100 МПа при средних скоростях деформации порядка 690 с^{-1} . На рис. 8 приведены осредненные диаграммы деформирования с хронологией изменения скорости деформации.

Таблица 6

Параметры испытаний СФБ при динамическом сжатии

Режим/ код эксперим.	Параметры нагружения			Параметры образца				Результаты эксперимента					
	Длина ударника, мм	Материал ударника	Давление КВД, атм.	Скорость м/с	D, мм	S, мм ²	L, мм	Максим. напряжен., МПа	Предвар. деформ., %	Скорость деформ., с ⁻¹	Время жизни Диаграмма	Фото-съемка	КДУ
1	с681-01	Дюраль	1	16,71	18,46	267,64	10,86	58,1	1,4	187,1	110,0	–	1,0
	с681-02	Дюраль	1	15,53	18,45	267,35	10,81	52,0	1,3	190,9	105,2	100,0	0,9
	с681-03	Дюраль	1	15,54	18,54	269,97	10,97	57,6	1,2	179,9	114,0	–	1,0
	с681-04	Дюраль	1	15,89	18,65	273,18	10,84	59,9	1,3	181,7	105,6	–	1,0
	с681-05	Дюраль	1	16,85	18,67	273,77	10,68	62,9	1,2	181,4	109,6	–	1,0
2	с681-06	Дюраль	2	23,06	18,57	270,84	10,83	85,2	1,9	251,1	109,2	100,0	1,4
	с681-07	Дюраль	2	24,43	18,46	267,64	10,99	82,3	1,9	268,3	113,2	112,5	1,4
	с681-08	Дюраль	2	23,73	18,47	267,93	10,87	79,7	1,8	228,1	116,4	112,5	1,3
	с681-09	Дюраль	2	24,19	18,71	274,94	10,90	91,9	1,8	272,1	118,0	112,5	1,5
3	с681-10	Дюраль	4	36,25	18,49	268,51	10,95	98,3	1,7	723,4	41,8	40,0	1,6
	с681-11	Дюраль	4	32,55	18,65	273,18	10,88	98,0	1,6	655,1	42,0	40,0	1,6
	с681-12	Дюраль	4	35,42	18,61	272,01	11,06	94,6	1,4	704,6	40,0	40,0	1,6
	с681-13	Дюраль	4	32,95	18,48	268,22	11,04	92,7	1,5	687,7	40,2	40,0	1,5
	с681-14	Дюраль	4	34,43	18,59	271,42	11,03	101,8	1,4	661,1	39,2	40,0	1,7

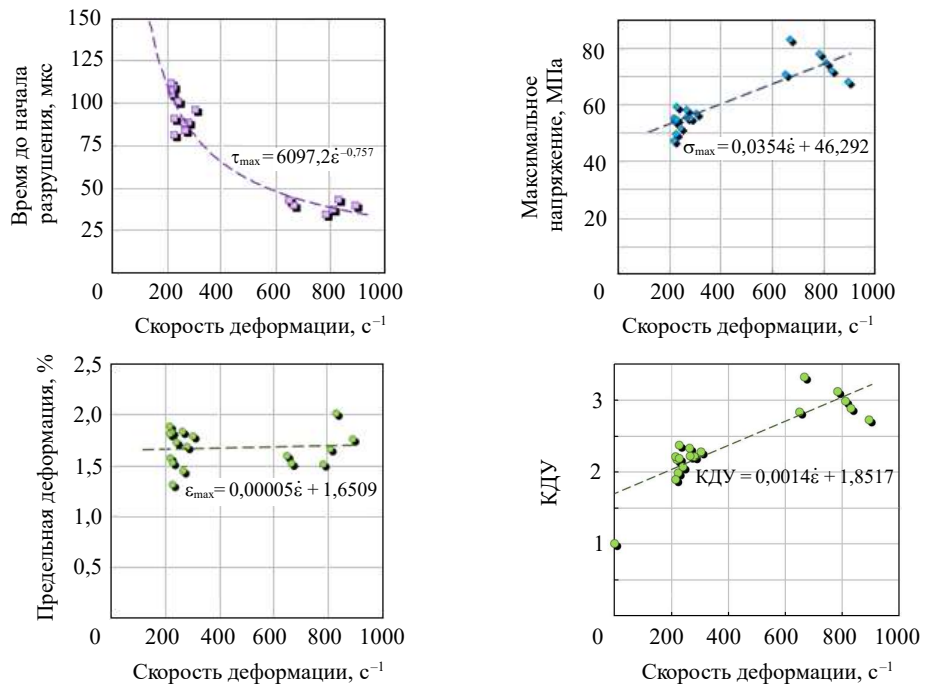


Рис. 7. Влияние скорости деформации на механические свойства ПФБ при динамическом сжатии

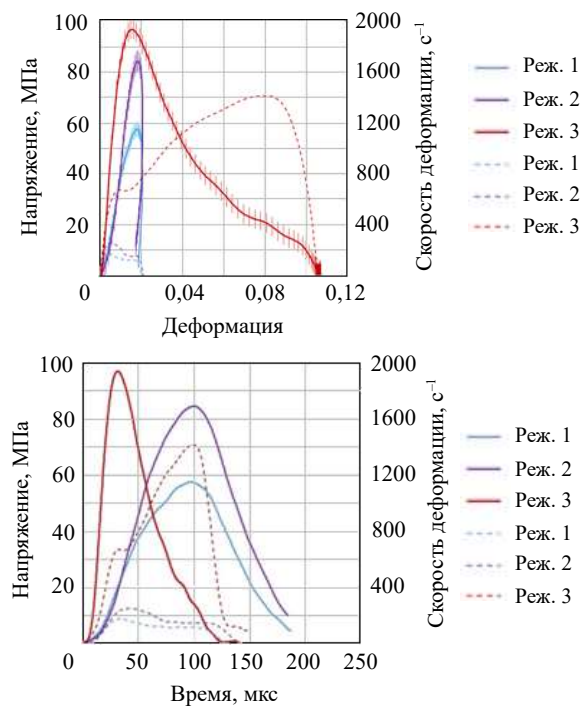


Рис. 8. Осредненные диаграммы при сжатии СФБ для всех режимов

На диаграммах в осях $\sigma \sim \epsilon$ на начальном участке нагружения рост напряжения и деформаций происходит по закону, близкому к линейному, а при дальнейшей де-

формации, при достижении предельных значений напряжений, бетон интенсивно разрушается, что сопровождается снижением напряжений и ростом деформаций. Влияние скорости деформации на физико-механические характеристики СФБ приведено на рис. 9.

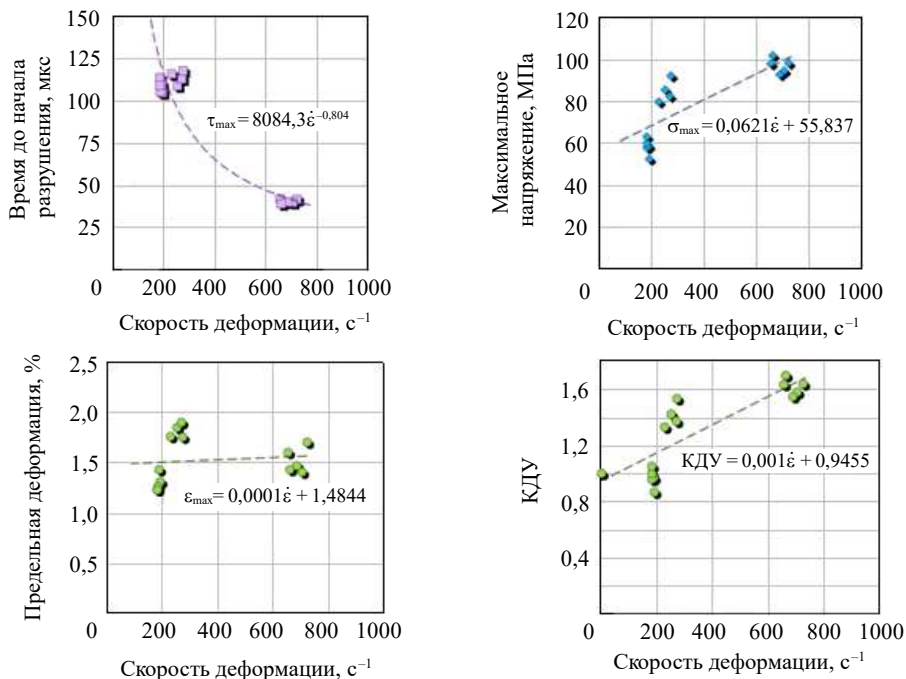


Рис. 9. Влияние скорости деформации на механические характеристики СФБ при динамическом сжатии

Проведенный цикл динамических испытаний КФБ состоял из 3 скоростных режимов и в сумме из 14 испытательных выстрелов. Скорости деформации находились в пределах от 140 до 740 с^{-1} . Параметры испытаний приведены в таблице 7.

В режиме №1 средняя скорость ударника равна 16 м/с. Средняя динамическая прочность на сжатие составила порядка 53 МПа при средних скоростях деформации около 160 с^{-1} . В режиме №2 средняя скорость ударника равна 24 м/с, средняя динамическая прочность на сжатие составила 68 МПа при средних скоростях деформации около 210 с^{-1} . В режиме №3 средняя скорость ударника 34 м/с, средняя динамическая прочность на сжатие составила 90 МПа при средних скоростях деформации порядка 710 с^{-1} . На рис. 10 приведены осредненные диаграммы деформирования с хронологией изменения скорости деформации.

Испытания на динамическое сжатие проводились с целью определения влияния изменения скорости деформации на деформационные и прочностные характеристики КФБ (рис. 11).

Для каждой из полученных диаграмм были выделены характерные точки с максимально достигнутыми напряжениями, после которых начинались разрушения образцов. Для этих точек определены соответствующие величины предельных деформаций и времени до начала разрушения. Скорости деформаций были приняты максимальными до начала разрушения образцов, поскольку они меняются в процессе их деформирования.

Таблица 7

Параметры испытаний КФБ при динамическом сжатии

Режим/ код эксперим.	Параметры нагружения				Параметры образца				Результаты эксперимента				
	Длина ударника, мм	Материал ударника	Давление КВД, атм.	Скорость ударника, м/с	D, мм	S, мм ²	L, мм	Максим. напряжен., МПа	Предвар. деформ., %	Скорость деформ., с ⁻¹	Время жизни Диаграмма	Фото-съемка	КДУ
1	с682-01	Дюраль	1	16,24	18,63	272,6	11,18	55,8	0,9	142,6	103,6	100,0	1,1
	с682-02	Дюраль	1	15,78	18,52	269,4	11,09	51,1	1,2	145,5	104,0	100,0	1,0
	с682-03	Дюраль	1	17,45	18,72	275,2	11,21	61,4	0,9	147,4	100,8	—	1,2
	с682-04	Дюраль	1	15,77	18,57	270,8	11,17	50,4	1,0	146,1	95,2	—	1,0
	с682-05	Дюраль	1	16,34	18,53	269,7	11,16	46,9	1,4	201,4	98,4	—	0,9
2	с682-06	Дюраль	2	23,83	18,65	273,2	11,17	65,9	1,2	220,1	76,8	75,0	1,3
	с682-07	Дюраль	2	24,27	18,73	275,5	11,23	70,8	1,5	225,8	95,2	87,5	1,4
	с682-08	Дюраль	2	23,19	18,75	276,1	11,16	73,6	1,4	191,4	98,8	100,0	1,4
	с682-09	Дюраль	2	23,38	18,53	269,7	11,26	63,0	1,2	216,8	84,0	75,5	1,2
3	с682-10	Дюраль	4	34,56	18,74	275,8	11,31	97,6	1,5	654,4	44,2	50,0	1,9
	с682-11	Дюраль	4	32,18	18,51	269,1	11,18	86,0	1,5	712,4	43,4	50,0	1,7
	с682-12	Дюраль	4	34,73	18,52	269,4	11,31	91,5	1,6	725,1	43,8	50,0	1,8
	с682-13	Дюраль	4	32,43	18,59	271,4	11,34	89,8	1,5	694,5	44,4	50,0	1,7
	с682-14	Дюраль	4	34,35	18,53	269,7	11,35	85,2	1,5	744,4	43,0	50,0	1,6

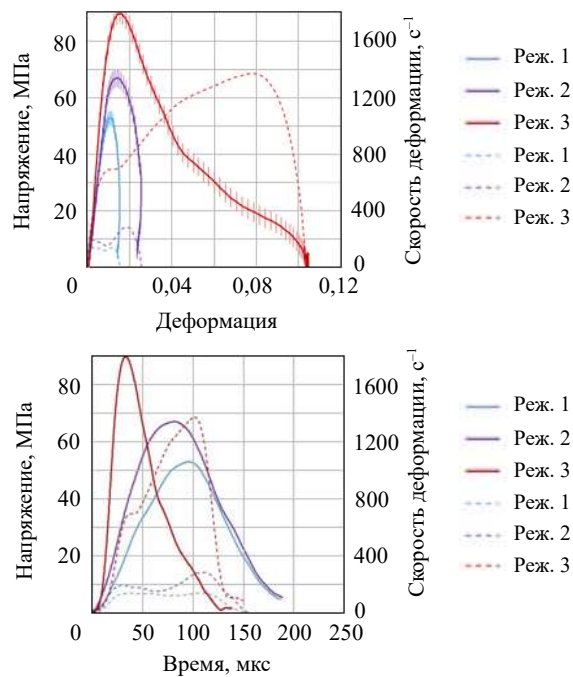


Рис. 10. Осредненные диаграммы при сжатии КФБ для всех режимов

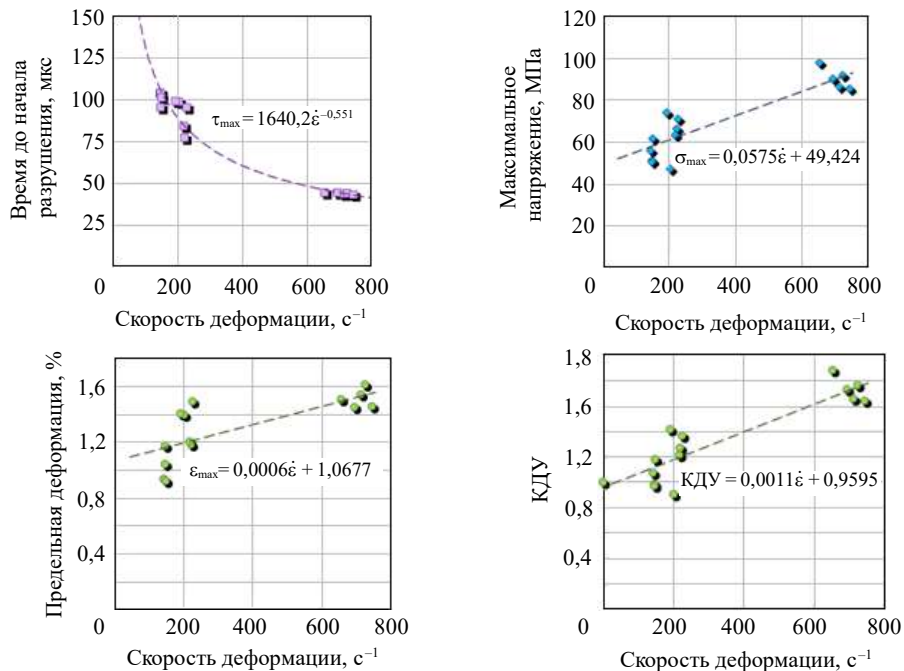


Рис. 11. Влияние скорости деформации на механические свойства КФБ при динамическом сжатии

Полученные зависимости показывают то, что с ростом скорости деформации максимальные напряжения увеличиваются, также растут и соответствующие им

предельные деформации (по линейному закону), а время до начала разрушения снижается по степенному закону.

В таблице 8 приведена средняя прочность и средний прирост процента прочности для испытываемых материалов относительно состава исходного мелкозернистого бетона.

Таблица 8

Средний прирост прочности исследованных материалов

№	Вид материала	Макс. напряжения, МПа			Средняя прочность, МПа	Средний прирост прочности, %	Средний КДУ
		Реж.№1	Реж.№2	Реж.№3			
Одноосное динамическое сжатие							
1	МЗБ	46	57	69	57	0	1,7
2	ПФБ	52	57	75	61	7	1,7
3	КФБ	53	68	90	70	18	1,3
4	СФБ	58	85	97	80	28	1,4

Заключение

Проведено экспериментальное исследование динамических свойств различных видов фибробетона при одноосном сжатии. Получены диаграммы динамического деформирования при скоростях деформации от 10^2 до 10^3 с⁻¹, по результатам которых определены прочностные и деформационные характеристики при различных скоростях деформации. Введение упрочняющей фибры в исходный мелкозернистый бетон повысило динамическую прочность материала при одноосном напряженном состоянии. Наивысшую прочность от 55 до 95 МПа при динамическом сжатии показал фибробетон со стальной фиброй. Наивысший средний КДУ, равный 1,7, показали исходный мелкозернистый бетон, а также бетон с полимерной фиброй.

Список литературы

1. Yu R., van Beers L., Spiesz P., Brouwers H.J.H. Impact resistance of a sustainable Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) under pendulum impact loadings. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 107. P. 203–215. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.157.
2. Wang D., Shi C., Wu Z., Xiao J., Huang Z., Fang Z. A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 96. P. 368–377. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.095>.
3. Li P.P., Yu Q.L. Responses and post-impact properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete under pendulum impact. *Composite Structures*. 2019. Vol. 208. P. 806–815. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.071>.
4. Li P.P., Brouwers H.J.H., Yu Q. Influence of key design parameters of ultra-high performance fibre reinforced concrete on in-service bullet resistance. *International Journal of Impact Engineering*. 2020. Vol. 136. P. 103434-1–103434-10. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103434.
5. Khosravani M.R., Weinberg K. A review on split Hopkinson bar experiments on the dynamic characterisation of concrete. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 190. P. 1264–1283. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.187.
6. Cao Y.Y.Y., Yu Q.L., Brouwers H.J.H., Chen W. Predicting the rate effects on hooked end fiber pullout performance from Ultra-High Performance Concrete (UHPC). *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 120. P. 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.022>.
7. Yoo D.-Y., Banthia N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Cement and Concrete Research*. 2016. Vol. 73. P. 267–280. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.08.001.

8. Shaikh F.U.A., Luhar S., Arel H.S., Luhar I. Performance evaluation of Ultrahigh performance fibre reinforced concrete – A review. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 232. Article No 117152. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117152.
9. Wang W., Liu J., Agostini F., Davy C.A., Skoczylas F., Corvez D. Durability of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPC) under progressive aging. *Cement and Concrete Research*. 2014. Vol. 55. P. 1–13. DOI: 10.1016/J.CEMCONRES.2013.09.008.
10. 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-13*. 11–13 Sep. 2013. Sapporo, Japan. 2013. P. B-5-1.
11. 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*. 20–22 July 2014. Yichang Hubei, China. 2014. P. 17–24.
12. Schenker A., Anteby I., Gal E. et al. Full-scale field tests of concrete slabs subjected to blast loads. *International Journal of Impact Engineering*. 2008. Vol. 35. Iss. 3. P. 184–98. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.12.008.
13. Wang F., Wan Y.K.M., Chong O.Y.K., Lim C.H., Lim E.T.M. Reinforced concrete slab subjected to close-in explosion. *Proceedings of the 7th Ls-Dyna Anwenderforum*. 30 Sep. 2008. Bamberg, Germany. 2008. P. J-1-21–J-1-29.
14. Zhang X., Elazim A.A., Ruiz G., Yu R. Fracture behaviour of steel fibre-reinforced concrete at a wide range of loading rates. *International Journal of Impact Engineering*. 2014. Vol. 71. P. 89–96. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.04.009.
15. Xu Z., Hao H., Li H. Dynamic tensile behaviour of fibre reinforced concrete with spiral fibres. *Materials and Design* 2012. Vol. 42. P. 72–88. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.05.047>.
16. Zhang X., Ruiz G., Elazim A.M.A. Loading rate effect on crack velocities in steel fiber-reinforced concrete. *International Journal of Impact Engineering*. 2015. Vol. 76. P. 60–66. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.09.004.
17. Man Xu, Bryan Hallinan, Kay Wille. Effect of loading rates on pullout behavior of high strength steel fibers embedded in ultra-high performance concrete (UHPC). *Cement and Concrete Composites*. 2016. Vol. 70. P. 98–108. DOI: 10.1016/j.cemconcomp. 2016.03.014.
18. Xu Z., Hao H., Li H.N. Experimental study of dynamic compressive properties of fibre reinforced concrete material with different fibres. *Materials and Design*. 2012. Vol. 33. P. 42–55. DOI:10.1016/j.matdes.2011.07.004.
19. Nia A.A., Hedayatian M., Nili M., Sabet V.A. An experimental and numerical study on how steel and polypropylene fibers affect the impact resistance in fiber-reinforced concrete. *International Journal of Impact Engineering*. 2012. Vol. 46. P. 62–73. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.01.009.
20. ACI Committee 544.3R-08. Guide for specifying, proportioning, and production of fibre reinforced concrete. *Reported by American Concrete Institute 544*. 2008. 16 p.
21. Redaelli D., Muttoni A. Tensile behaviour of reinforced ultra-high performance fiber reinforced concrete elements. *Concrete Structure. Simulator of Development: Symposium*. 20–23 May 2007. Dubrovnik, Croatia. 2007. P. 267–274.
22. 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.
23. Bragov A.M., Igumnov L.A., Lomunov A.K. *High-Speed Deformation of Fine-Grained Concrete and Fiber-Reinforced Concrete*. N. Novgorod: Nizhny Novgorod State University Publishing House, 2015. 269 p.
24. Bragov A.M., Konstantinov A.Y., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Karihaloo B.L., Petrov Y.V., Smirnov I.V.: High-rate deformation and fracture of fiber reinforced concrete. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2012. Vol. 53. Iss. 6. P. 926–933. DOI: 10.1134/S0021894412060168.
25. Bragov A.M., Gonov M.E., Lomunov A.K. Experimental study of the dynamic properties of concrete under compressive load. *International Conference on Nonlinear Solid Mechanics ICoNSOM 2019*. 16–22 Jun. 2019. Roma, Italy. P. 403–412.

References

1. Yu R., van Beers L., Spiesz P., Brouwers H.J.H. Impact resistance of a sustainable Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) under pendulum impact loadings. *Constr. Build. Mater.* 2016. Vol. 107. P. 203–215. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.157.
2. Wang D., Shi C., Wu Z., Xiao J., Huang Z., Fang Z. A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties. *Constr. Build. Mater.* 2015. Vol. 96. P. 368–377. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.095>.
3. Li P.P., Yu Q.L. Responses and post-impact properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete under pendulum impact. *Compos. Struct.* 2019. Vol. 208. P. 806–815. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.071>.
4. Li P.P., Brouwers H.J.H., Yu Q. Influence of key design parameters of ultra-high performance fibre reinforced concrete on in-service bullet resistance. 2020. Vol. 136. P. 103434-1–103434-10. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103434.
5. Khosravani M.R., Weinberg K. A review on split Hopkinson bar experiments on the dynamic characterisation of concrete. *Constr. Build. Mater.* 2018. Vol. 190. P. 1264–1283. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.187.
6. Cao Y.Y.Y., Yu Q.L., Brouwers H.J.H., Chen W. Predicting the rate effects on hookedend fiber pullout performance from Ultra-High Performance Concrete (UHPC). *Cem. Concr. Res.* 2019. Vol. 120. P. 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.022>.
7. Yoo D.-Y., Banthia N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Cem. Concr. Compos.* 2016. Vol. 73. P. 267–280. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.08.001.
8. Shaikh F.U.A., Luhar S., Arel H.S., Luhar I. Performance evaluation of Ultrahigh performance fiber reinforced concrete – A review. *Constr. Build. Mater.* 2020. Vol. 232. Article No 117152. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117152.
9. Wang W., Liu J., Agostini F., Davy C.A., Skoczylas F., Corvez D. Durability of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) under progressive aging. *Cem. Concr. Res.* 2014. Vol. 55. P. 1–13. DOI: 10.1016/J.CEMCONRES.2013.09.008.
10. 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-13*. 11–13 Sep. 2013. Sapporo, Japan. 2013. P. B-5-1.
11. 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*. 20–22 July 2014. Yichang Hubei, China. 2014. P. 17–24.
12. Schenker A., Anteby I., Gal E., et al. Full-scale field tests of concrete slabs subjected to blast loads. *Int. J. Impact Eng.* 2008. Vol. 35. Iss. 3. P. 184–98. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.12.008.
13. Wang F., Wan Y.K.M., Chong O.Y.K., Lim C.H., Lim E.T.M. Reinforced concrete slab subjected to close-in explosion. *Proceedings of the 7th Ls-Dyna Anwenderforum*. 30 Sep. 2008. Bamberg, Germany. 2008. P. J-1-21–J-1-29.
14. Zhang X., Elazim A.A., Ruiz G., Yu R. Fracture behaviour of steel fibre-reinforced concrete at a wide range of loading rates. *Int. J. Impact. Eng.* 2014. Vol. 71. P. 89–96. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.04.009.
15. Xu Z., Hao H., Li H. Dynamic tensile behaviour of fibre reinforced concrete with spiral fibres. *Mater. Des.* 2012. Vol. 42. P. 72–88. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.05.047>.
16. Zhang X., Ruiz G., Elazim A.M.A. Loading rate effect on crack velocities in steel fiber-reinforced concrete. *Int. J. Impact. Eng.* 2015. Vol. 76. P. 60–60. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.09.004.
17. Man Xu, Bryan Hallinan, Kay Wille. Effect of loading rates on pullout behavior of high strength steel fibers embedded in ultra-high performance concrete (UHPC). *Cem. Concr. Compos.* 2016. Vol. 70. P. 98–109. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2016.03.014.
18. Xu Z., Hao H., Li H.N. Experimental study of dynamic compressive properties of fibre reinforced concrete material with different fibres. *Mater. Des.* 2012. Vol. 33. P. 42–55. DOI:10.1016/j.matdes.2011.07.004.
19. Nia A.A., Hedayatian M., Nili M., Sabet V.A. An experimental and numerical study on

how steel and polypropylene fibers affect the impact resistance in fiber-reinforced concrete. *Int. J. Impact. Eng.* 2012. Vol. 46. P. 62–73. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.01.009.

20. ACI Committee 544.3R-08. Guide for specifying, proportioning, and production of fibre reinforced concrete. *Reported by American Concrete Institute 544*. 2008. 16 p.

21. Redaelli D., Muttoni A. Tensile behaviour of reinforced ultra-high performance fiber reinforced concrete elements. *Concrete Structure. Simulator of Deveopment: Symposium*. 20–23 May 2007. Dubrovnik, Croatia. 2007. P. 267–274.

22. Song P., Hwang S. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* 2004. Vol. 18. Iss. 9. P. 669–673. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027.

23. Bragov A.M., Igumnov L.A., Lomunov A.K. *High-Speed Deformation of Fine-Grained Concrete and Fiber-Reinforced Concrete*. N. Novgorod. Nizhny Novgorod State University Publishing House. 2015. 269 p.

24. Bragov A.M., Konstantinov A.Y., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Karihaloo B.L., Petrov Y.V., Smirnov I.V. High-rate deformation and fracture of fiber reinforced concrete. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2012. Vol. 53. Iss. 6. P. 926–933. DOI: 10.1134/S0021894412060168.

25. Bragov A.M., Gonov M.E., Lomunov A.K. Experimental study of the dynamic properties of concrete under compressive load. *International Conference on Nonlinear Solid Mechanics ICoNSOM 2019*. 16–22 Jun. 2019. Roma, Italy. P. 403–412.

MECHANICAL PROPERTIES OF FIBER CONCRETE UNDER DYNAMIC COMPRESSION

Gonov M.E.

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

The article discusses the results of an experimental study of high-speed deformation and destruction of four types of concrete under dynamic uniaxial compression. The introduction presents an overview of experimental studies of domestic and foreign authors of the dynamic properties of fiber-reinforced concrete. World practice confirms the expediency of introducing metal fibers into concrete in order to increase its strength dynamic properties. However, the combination of steel and polymer fibers has not been fully studied and is of current interest.

Fine-grained concrete, steel fiber-reinforced concrete, polyfiber-reinforced concrete and combined fiber-reinforced concrete were tested at high-speed deformation. According to the results of the study, static and dynamic tests were carried out. Dynamic compression tests were carried out using the Kolsky method at strain rates from 10^2 to 10^3 s⁻¹. Static tests were carried out on a hydraulically driven unit. To visualize the process of dynamic deformation and fracture, a high-speed FASTCAM Mini UX100 camera was used. The paper presents the compositions of the studied materials, test parameters, as well as a comparative analysis of the data obtained. The introduction of a reinforcing fiber into the original fine-grained concrete increased the dynamic strength of the material. In static tests, concrete with steel fibers and concrete with a combination of polymer and steel fibers showed close values for maximum strength. The highest strength under dynamic uniaxial compression was shown by fiber-reinforced concrete with steel fiber. The dependences obtained demonstrate that the maximum fracture stresses achieved in the experiments increase linearly with the growth of the strain rate and the corresponding limiting strains, while the time before the onset of fracture decreases according to a power law.

Keywords: dynamic strength, stress, strain, strain rate, concrete, fiber-reinforced concrete, dynamic tests, Kolsky method, experiment.