

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2020-82-4-442-457

**КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ  
МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА  
ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ И СРЕЗЕ\***

© 2020 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 29.09.2020*

Проведено экспериментальное исследование динамических свойств мелкозернистого бетона при растягивающих и срезающих напряжениях. Представлена методика испытаний, параметры образцов и режимы проведенных экспериментов. Используемая в исследовании система экспериментов основана на модификациях метода Кольского, которые позволяют определить прочностные и деформационные, а также временные характеристики деформирования бетона при высокоскоростном нагружении. Исследование бетона при динамическом нагружении было выполнено с помощью модификаций метода Кольского для различных схем: прямое растяжение, раскалывание («бразильский тест») и срез. В экспериментах на прямое растяжение и раскалывание реализованы по два скоростных режима. Динамические испытания на срез проведены при трех скоростных режимах. На основании проведенных экспериментов получены диаграммы деформирования при растяжении и диаграммы зависимостей напряжения от времени при раскалывании и срезе. Результаты исследования свидетельствуют о влиянии скорости деформации на предельные растягивающие характеристики прочности, которые составляют порядка 8 МПа. Определен коэффициент динамического упрочнения бетона при растяжении, зависящий от скорости деформации, значение которого находится в пределах от 4 до 6. При испытаниях на прямое растяжение и раскалывание получен обратный эффект влияния скорости нагружения: при увеличении скорости ударника, следовательно и скорости деформации, максимальные достигнутые напряжения, при которых начинается разрушение образца, уменьшаются. Получены динамические характеристики мелкозернистого бетона. Найденные характеристики могут быть использованы для оснащения математических моделей вычислительных экспериментов при исследовании прочности бетонных конструкций, подвергающихся динамическим воздействиям.

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

---

\* Экспериментальные исследования выполнены при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект 0729-2020-0054).

## Введение

В настоящее время актуально изучение динамических свойств хрупких материалов, таких как бетон и его разновидности. Это связано с тем, что бетон является одним из наиболее распространенных конструкционных материалов. Он широко применяется при строительстве зданий и сооружений гражданского, промышленного и военного назначения. В процессе эксплуатации в результате возникновения нештатных ситуаций бетонные конструкции могут испытывать интенсивные динамические воздействия. К подобным нагрузкам можно отнести природные катастрофы (тайфуны, цунами, оползни, землетрясения), техногенные катастрофы гражданского или промышленного происхождения, террористические акты.

Для построения математических моделей, описывающих деформирование и разрушение бетона, необходимо проводить комплексное исследование характеристик бетона и их влияния на динамические свойства материала. Для расчета на прочность бетонных конструкций в нештатных ситуациях необходимо знать, каким образом динамические нагрузки влияют на физико-механические свойства бетонов.

Экспериментальные исследования динамических свойств бетона при растягивающих динамических нагрузках позволяют получить значения различных параметров и константы, которые необходимы для оснащения моделей динамического деформирования и разрушения. Получаемые математические модели на основе экспериментальных данных позволяют адекватно описывать поведение реального материала при расчетах напряженно-деформированного состояния (НДС) и прочности конструкций в таких программно-вычислительных комплексах, как ANSYS, LS-DYNA, ABAQUS, ЛОГОС и др.

В мировом научном сообществе ведется активная работа по исследованию динамических свойств хрупких материалов. В статье [1] исследуются динамические свойства пористого бетона, который благодаря своим характеристикам разрушается на мелкие фрагменты при воздействии ударной нагрузки за счет образования множества трещин. В этом случае пористость является одним из главных факторов, влияющим на характер динамического деформирования и разрушения. В публикациях [2–4] исследуется ряд факторов, влияющих на динамическую прочность бетона при ударных испытаниях. Статья [5] посвящена экспериментальному методу определения прочности бетона на растяжение при высоких скоростях деформации, который позволяет выявить значительное увеличение динамической прочности под влиянием скорости деформации.

В статьях [6–10] описывается моделирование динамических свойств бетона при растяжении и утверждается, что скорость нагружения имеет значительное влияние на процессы разрушения и общую прочность. В [11] изучаются характеристики бетона из переработанного заполнителя под воздействием ударной нагрузки, влияние количества заполнителя и его влажности на прочностные показатели. В статье [12] исследуется реакция высокопрочного бетона на динамическую сжимающую нагрузку с помощью метода Кольского. В [13] приведено экспериментальное исследование динамического поведения инновационного бетонного композита, предназначенного для снижения повреждений конструкций, подверженных высокоскоростным нагрузкам.

На основе анализа приведенных источников можно сделать вывод, что некоторые свойства бетона исследованы не до конца и до сих пор актуально экспериментальное изучение этого направления.

Настоящая статья посвящена исследованию динамических свойств бетона при растягивающих и сжимающих напряжениях.

### Методика испытаний

Для исследования динамических свойств бетонов существует ряд методов, среди которых наиболее часто применяемым и результативным является метод Кольского [14]. Модификации этого метода позволяют получить комплексную систему базовых экспериментов [15–17].

Испытывался мелкозернистый бетон класса В22,5, состав которого указан в таблице 1.

Таблица 1

Состав мелкозернистого бетона

№	Материал	Расход, кг/м <sup>3</sup>
1	Цемент марка 500D	430
2	Песок крупный (модуль 3 мм)	1435
3	Песок мелкий (модуль 1,6 мм)	355
4	Пластифицирующая добавка Murasan BWA 16	1,6
5	Вода	120

Экспериментальная установка для метода Кольского включает в себя ударник 1 и систему мерных стержней (нагружающий стержень 2, опорный стержень 5), между которыми устанавливается испытываемый образец 4, газовую пушку (для разгона цилиндрического ударника 1), тензодатчики 3 и 6, измеритель скорости, демпфер [16], регистрирующую и вычислительную аппаратуру с программным комплексом (рис. 1).

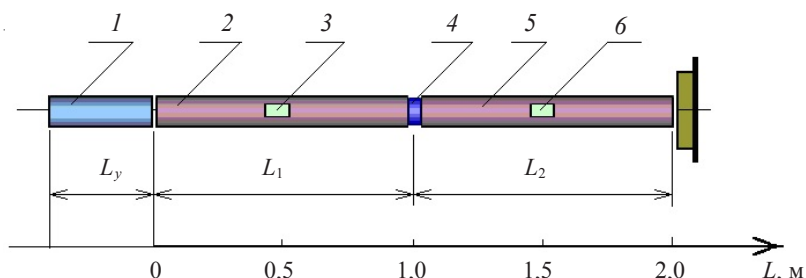


Рис. 1. Схема установки для метода Кольского при сжатии

Исследование бетона при динамическом нагружении было выполнено с использованием следующих схем:

- прямое растяжение с помощью модификации метода Кольского [18];
- раскалывание («бразильский тест» или не прямое растяжение) [19];
- срез (сжатие цилиндрического образца с использованием жесткой обоймы, разрезанной под углом к оси образца) для нахождения динамической прочности при срезе [20].

Указанная система экспериментов позволяет проводить динамические испытания бетона в широком диапазоне скоростей деформации ( $10^2$ – $10^4$  с<sup>-1</sup>).

Экспериментальная установка на прямое растяжение (рис. 2) отличается от традиционной установки по методу Кольского на сжатие тем, что трубчатый ударник разгоняется в стволе посредством газовой пушки, после чего ударяет по наковальне, которая закреплена на конце нагружающего мерного стержня, тем самым возбуждая в нем упругую волну растяжения. Образец в свою очередь приклеивается либо к мерным стержням, либо к специальным резьбовым насадкам, которые вкручиваются в мерные стержни диаметром 20 мм из высокопрочной стали с модулем упругости  $1,85 \cdot 10^5$  МПа.

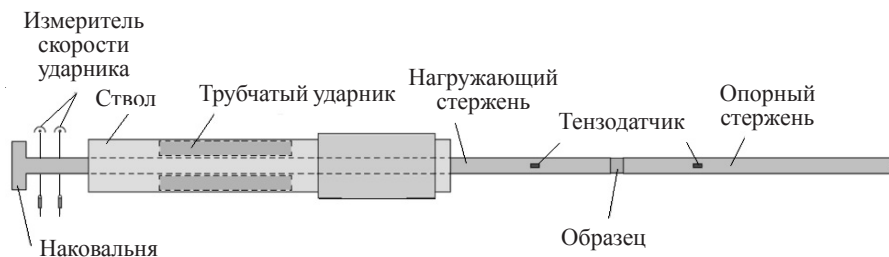


Рис. 2. Схема экспериментальной установки на прямое растяжение

Бетонные образцы для испытаний на прямое растяжение диаметром чуть менее 20 мм, длиной 10 мм высверливаются с помощью настольного сверлильного станка, после чего приклеиваются с помощью эпоксидного клея с добавлением вольфрамовой пудры для повышения прочности клеевого шва.

Эксперименты на раскалывание проводятся с помощью традиционной установки по методу Кольского при сжатии с небольшой модификацией. Отличие заключается в том, что испытываемый цилиндрический образец устанавливается по цилиндрической образующей и при испытании раскалывается по диаметральной плоскости на две половинки. Схема испытания приведена на рис. 3.

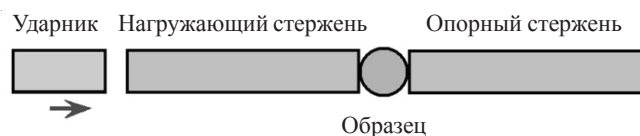


Рис. 3. Схема испытания на раскалывание

В указанной модификации использовались дюралюминиевые мерные стержни диаметром 20 мм сплошного (нагружающий) и полого (опорный) сечения с модулем упругости  $0,71 \cdot 10^5$  МПа. Трубчатый опорный стержень применялся для более точной регистрации упругих импульсов. Бетонные образцы для испытаний на раскалывание диаметром 20 мм и длиной 10 мм также высверливались с помощью настольного сверлильного станка (рис. 4).

Для проведения экспериментов на срез применяется модификация метода Кольского [20] для определения динамической прочности при срезе, в которой бетонный образец располагается в жесткой обойме, разрезанной под углом  $\alpha$  к оси образца (рис. 5). Импульс, зарегистрированный в опорном мерном стержне, позволяет построить временную зависимость срезающего напряжения в образце.

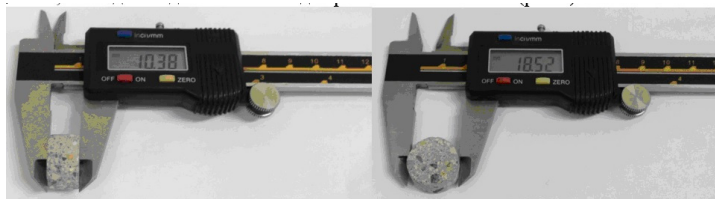


Рис. 4. Образцы для испытаний на раскалывание

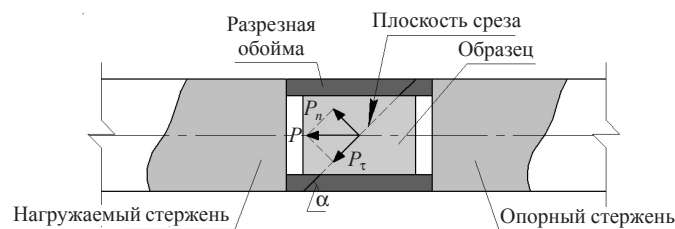


Рис. 5. Модификация метода Кольского для определения прочности бетона на срез

В этой модификации так же, как и в экспериментах на раскалывание, использовались дюралюминиевые мерные стержни диаметром 20 мм сплошного и полого сечения с модулем упругости  $0,71 \cdot 10^5$  МПа. Бетонные образцы для испытаний на срез диаметром 15 мм и длиной 25 мм высверливались с помощью настольного сверлильного станка (рис. 6).



Рис. 6. Разрезные обоймы и образцы для испытаний на срез

### Экспериментальные результаты при динамическом прямом растяжении

При испытаниях на прямое растяжение было реализовано два скоростных режима. Результаты экспериментов для ударника длиной 200 мм из дюралюминия и некоторые параметры, определенные по этим результатам, приведены в таблице 2.

На рис. 7, 8, 10 представлены диаграммы испытаний бетонных образцов на прямое растяжение по модифицированному методу Кольского. Для этой серии опытов на рис. 7а, 8а, 10а сплошными линиями показаны зависимости напряжения, а штриховыми линиями того же цвета – зависимости скорости деформации от времени (соответствующая ось расположена справа). На рис. 7б, 8б, 10б сплошными линиями показаны зависимости напряжения, а штриховыми линиями того же цвета – зависимости скорости деформации от деформации.

Таблица 2

**Параметры экспериментов на прямое растяжение**

Режим	Код и № эксперимента	Параметры н нагружения		Параметры образца			Результаты эксперимента			
		Давление КВД, атм	Скорость ударника, м/с	Диаметр, мм	Площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup>	Длина, мм	Максимальное напряжение, МПа	Предельная деформация, МПа	Скорость деформации, 1/с	Время жизни, мкс
1	t637-01	1,4	7,11	18,64	272,74	10,51	13,43	1,31	539,07	43
	t637-02	1,4	7,87	18,51	268,95	10,52	13,79	1,10	567,69	34,5
	t637-03	1,4	7,64	18,65	273,04	10,35	11,20	0,89	525,76	35
	t637-04	1,2	6,38	18,69	274,21	10,41	13,04	0,831	380,64	34
	t637-05	1,2	5,94	18,7	274,50	10,39	13,01	1,00	373,56	39
2	t637-06	1,4	10,85	18,28	262,31	10,37	8,94	0,92	723,52	25,5
	t637-07	1,6	11,23	18,53	269,53	9,96	8,24	1,11	844,88	26,5
	t637-08	1,6	11,39	18,47	267,79	10,35	10,75	0,95	750,21	21
	t637-09	1,6	10,54	18,2	260,02	10,42	6,44	0,66	545,00	24
	t637-10	1,6	10,95	18,09	256,88	9,63	8,49	0,93	727,69	29,5

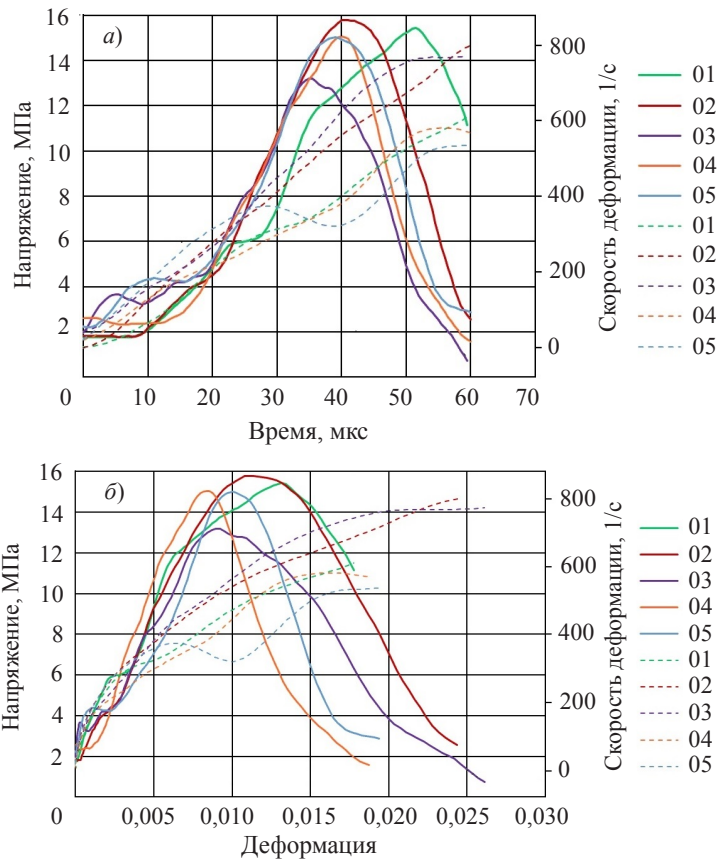


Рис. 7. Диаграммы испытаний на растяжение (режим №1)

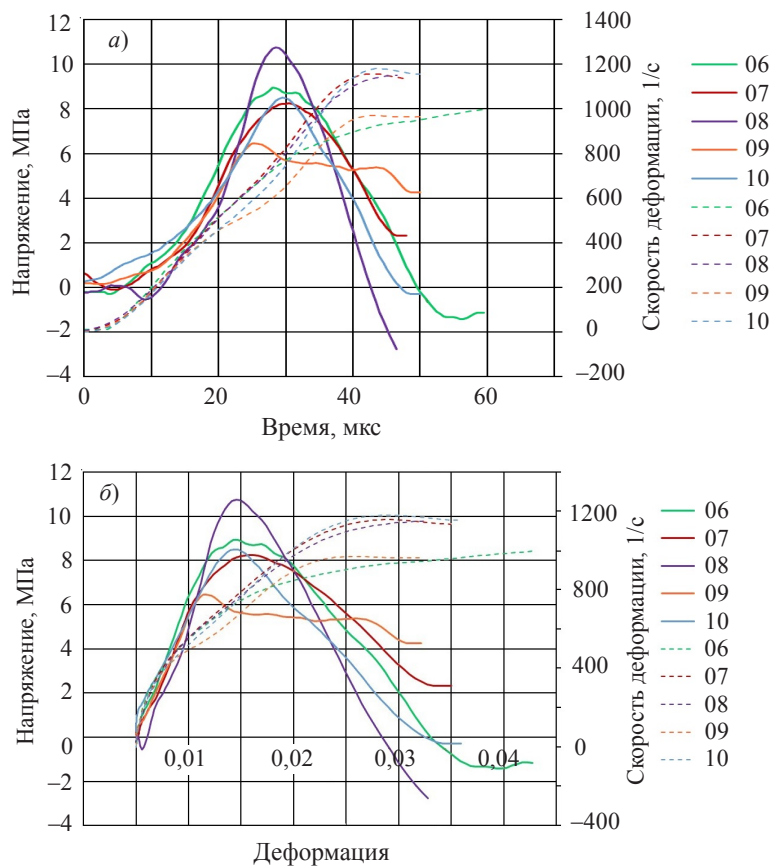


Рис. 8. Диаграммы испытаний на растяжение (режим №2)

В первом режиме (см. рис. 7) было выполнено 5 экспериментов (t637-01–t637-05), средняя скорость ударника 7 м/с, средняя скорость деформации 500 с<sup>-1</sup>, среднее максимальное растягивающее напряжение 12 МПа. Во втором режиме (см. рис. 8) также было выполнено 5 экспериментов (t637-06–t637-10). Средняя скорость ударника составила 11 м/с, средняя скорость деформации 700 с<sup>-1</sup>, среднее максимальное растягивающее напряжение 8 МПа.

На рис. 9 показан образец до и после разрушения при растяжении.



Рис. 9. Вид образца до и после разрушения при растяжении

На рис. 10 показаны осредненные диаграммы испытаний бетона при растяжении.

Таким образом, по результатам испытаний на прямое растяжение наблюдается снижение динамической прочности при увеличении скорости деформации.

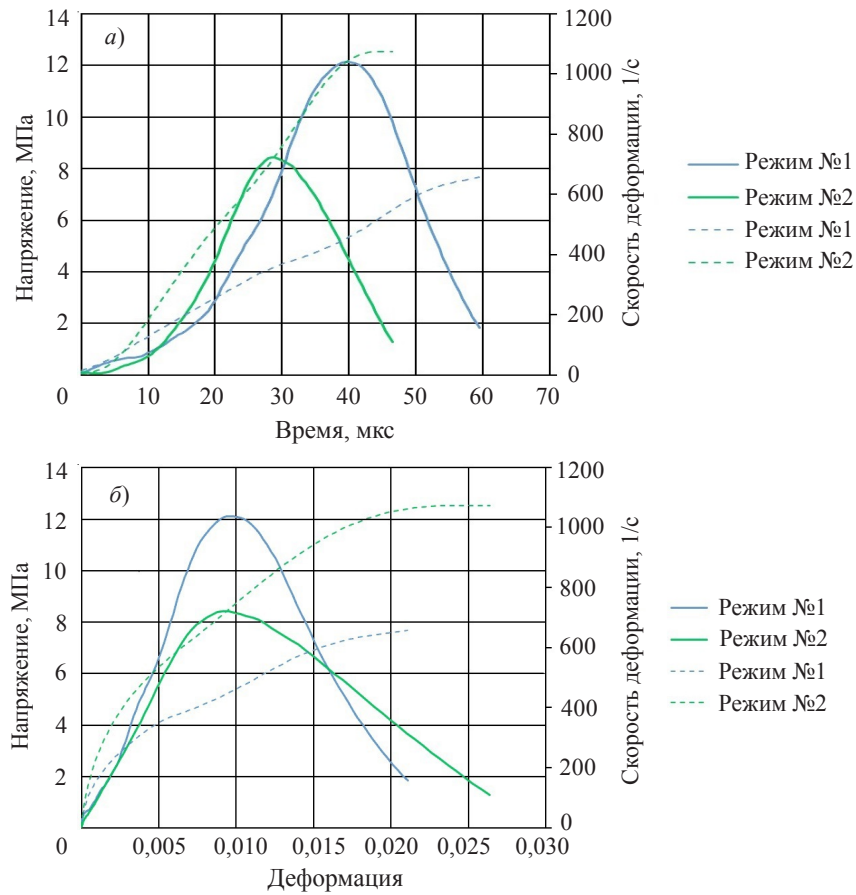


Рис. 10. Осредненные диаграммы испытательных режимов №1 и №2 при растяжении

### Экспериментальные результаты при динамическом раскалывании

Для определения предельного растягивающего напряжения мелкозернистого бетона при раскалывании («бразильский тест») реализованы два скоростных режима. Результаты экспериментов для ударника длиной 200 мм из дюралюминия и некоторые параметры, определенные по этим результатам, приведены в таблице 3.

Таблица 3

Параметры экспериментов при раскалывании

Режим	Код и № эксперимента	Параметры нагружения		Параметры образца			Результаты эксперимента		
		Давление КВД, атм	Скорость ударника, м/с	Диаметр, мм	Площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup>	Длина, мм	Максимальное напряж., МПа	Скорость роста напряж., ГПа/с	Время жизни, мкс
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	r637-11	0,75	7,88	18,62	272,16	14,48	7,61	431	25
	r637-12	0,75	6,49	18,57	270,70	14,41	7,60	394	30
	r637-13	0,75	6,76	18,62	272,16	14,34	7,50	265	35



Таблица 3 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	r637-14	0,75	7,74	18,64	272,75	14,21	8,14	506	29
	r637-15	0,75	7,89	18,61	271,87	14,21	7,74	458	28
2	r637-16	1,5	16,46	18,59	271,29	14,18	8,48	532	25
	r637-17	1,5	16,96	18,59	271,29	14,16	4,60	367	23
	r637-18	1,5	16,33	18,61	271,87	14,11	5,01	352	24
	r637-19	1,5	16,65	18,63	272,46	14	4,33	352	22
	r637-20	1,5	16,49	18,62	272,16	13,88	4,53	329	20
	r637-21	1,5	16,60	18,64	272,75	13,92	5,72	475	18

В первом режиме (рис. 11) было выполнено пять экспериментов (r637-11–r637-15); средняя скорость ударника составила 7 м/с, среднее максимальное раскалывающее напряжение 8 МПа, среднее время до начала разрушения 30 мкс (время жизни). Во втором скоростном режиме (рис. 12) было выполнено шесть экспериментов (r637-16–r637-21); средняя скорость ударника составила 17 м/с, среднее максимальное раскалывающее напряжение 6 МПа, среднее время до начала разрушения 22 мкс.

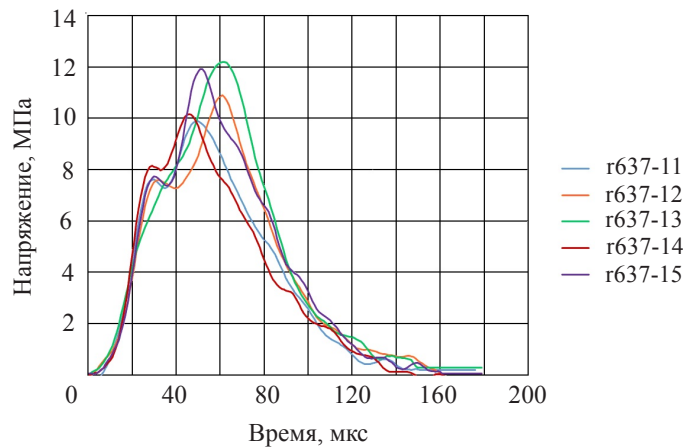


Рис. 11. Диаграммы испытаний на раскалывание (режим №1)

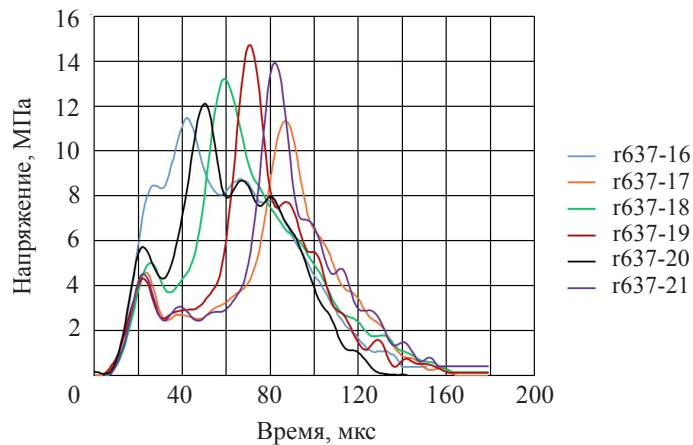


Рис. 12. Диаграммы испытаний на раскалывание (режим №2)

На рис. 13 показан образец до и после разрушения, а на рис. 14 показаны осредненные диаграммы испытаний бетона при раскалывании.

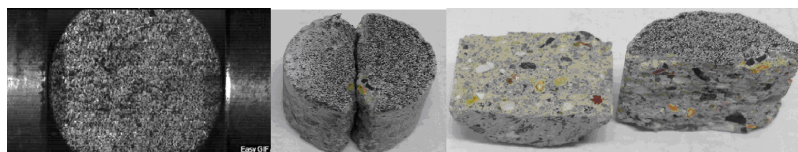


Рис. 13. Вид образца до и после раскалывания

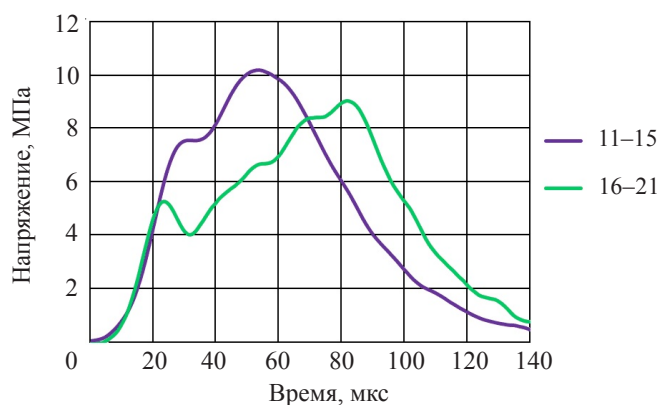


Рис. 14. Осредненные диаграммы испытательных режимов №1 и №2

Таким образом, по результатам испытаний на раскалывание наблюдается снижение динамической прочности при более высокой скорости нагружения.

### Экспериментальные результаты динамических испытаний на срез

При решении ряда задач поведения бетонов при ударе и проникании важную роль играет его прочность на срез. При испытаниях на срез были реализованы три скоростных режима. Результаты экспериментов для ударника длиной 200 мм из дюралюминия и некоторые параметры, определенные по этим результатам, приведены в таблице 4.

Таблица 4

Параметры экспериментов при динамическом срезе

Режим	Код и № эксперимента	Параметры нагружения		Параметры образца			Результаты эксперимента	
		Давление КВД, атм	Скорость ударника, м/с	Диаметр, мм	Площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup>	Длина, мм	Максимальное напряж., МПа	Время жизни, мкс
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	s637-02	1	10,92	14,45	202,60	25,11	5,85	25
	s637-03	1	10,63	14,48	203,45	25	4,45	21
	s637-04	1	10,84	14,46	202,88	25,07	5,01	24
	s637-05	1	10,91	14,48	203,45	25,04	4,37	24

Таблица 4 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	s637-21	1	10,67	14,51	204,29	25,08	4,99	21
2	s637-06	1,2	14,02	14,47	203,17	25,2	4,82	21
	s637-09	1,2	14,18	14,47	203,17	25,06	4,42	19
	s637-10	1,2	13,48	14,44	202,32	25,05	4,28	23
	s637-11	1,2	13,54	14,49	203,73	25,02	5,84	21
	s637-12	1,2	13,88	14,51	204,29	25,09	5,07	20
3	s637-13	0,8	7,88	14,46	202,88	25,1	4,95	22
	s637-14	0,8	8,25	14,47	203,17	24,87	5,82	26
	s637-16	0,8	8,62	14,51	204,29	25	6,20	36
	s637-17	0,8	9,33	14,47	203,17	25,02	5,40	25
	s637-19	0,8	8,52	14,48	203,45	25,12	5,35	30

В первом режиме (рис. 15) было выполнено пять экспериментов (s637-02–s637-05, s637-21). Средняя скорость ударника составила 11 м/с, среднее максимальное срезающее напряжение 5 МПа, среднее время до разрушения образца 23 мкс.

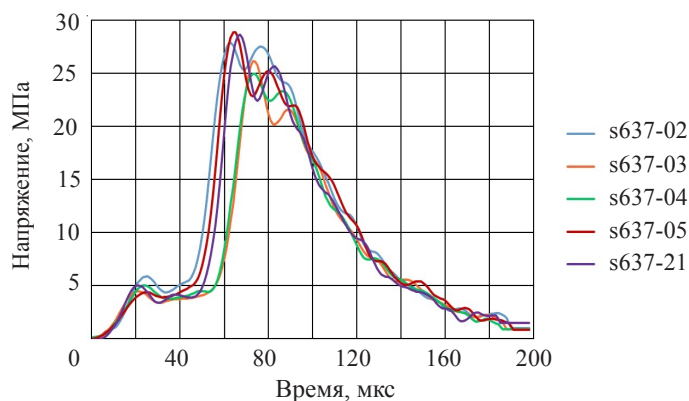


Рис. 15. Диаграммы испытаний на срез (режим №1)

Во втором режиме (рис. 16) также было выполнено пять экспериментов (s637-06–s637-12); средняя скорость ударника составила 13 м/с, среднее максимальное срезающее напряжение 5 МПа, среднее время до разрушения образца 21 мкс.

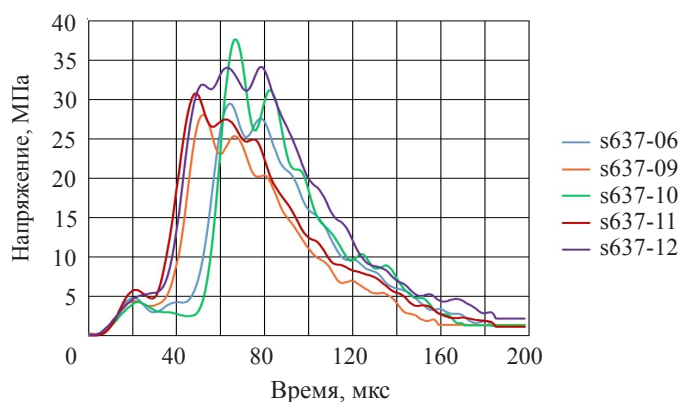


Рис. 16. Диаграммы испытаний на срез (режим №2)

При третьем режиме нагружения (пять экспериментов s637-13–s637-19, рис. 17) средняя скорость ударника составила 8,5 м/с, среднее максимальное сдвигающее напряжение 5,5 МПа, среднее время до разрушения образца 28 мкс.

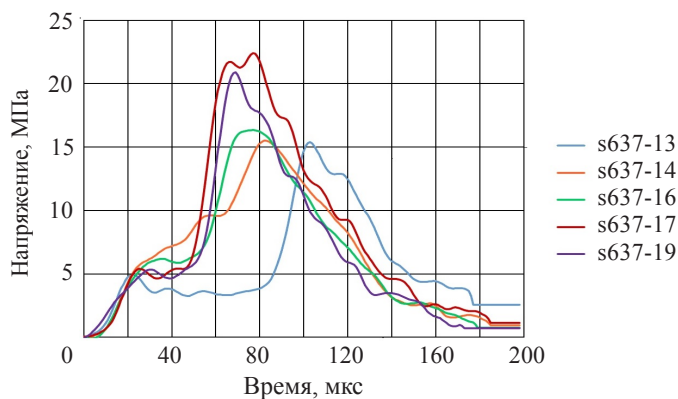


Рис. 17. Диаграммы испытаний на срез (режим №3)

На рис. 18 показан образец до и после разрушения, а на рис. 19 показаны осредненные диаграммы испытаний бетона на срез.



Рис. 18. Вид образца до и после испытания на срез

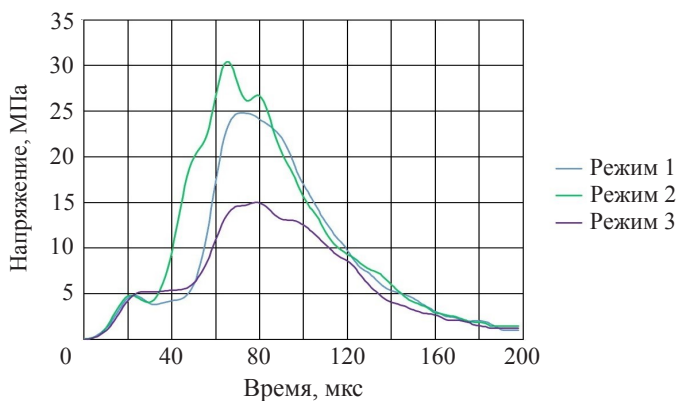


Рис. 19. Осредненные диаграммы режимов №1, №2 и №3 при испытаниях на срез

### Заключение

Приведены результаты комплексного исследования динамических свойств мелкозернистого бетона при растягивающих и сдвиговых динамических нагрузках. Представлена методика испытаний, параметры образцов и режимы проведенных экспериментов. На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Система экспериментов, основанная на модификациях метода Кольского, позволяет определить спектр прочностных и временных характеристик бетона при ударном нагружении.

2. Предельная динамическая прочность бетона в испытаниях на раскалывание находилась в пределах от 6 до 8 МПа; в испытаниях на растяжение – от 8 до 12 МПа при скоростях деформации от 500 до 700 с<sup>-1</sup>; в испытаниях на срез – в среднем 5-6 МПа.

3. Коэффициент динамического упрочнения (КДУ) бетона при растяжении находится в пределах от 4 до 6 и зависит от скорости деформации. КДУ рассчитывался как отношение максимального достигнутого в опыте напряжения к статической прочности бетона при растяжении (2,25 МПа).

4. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о влиянии скорости деформации на предельные характеристики прочности при растяжении.

5. При испытаниях на прямое растяжение и раскалывание получен обратный эффект влияния скорости нагружения: при увеличении скорости ударника, а следовательно и скорости деформации, максимальные достигнутые напряжения, при которых начинается разрушение образцов, уменьшаются.

Таким образом, проведенные испытания на растяжение, раскалывание и срез позволили получить динамические характеристики мелкозернистого бетона для составления математических моделей и расчетов напряженно-деформированного состояния. Полученные характеристики могут быть использованы в прикладных научных исследованиях для оценок прочности конструкций, подвергающихся динамическим воздействиям, в различных программно-вычислительных комплексах.

#### Список литературы

1. Ozbek A.S.A., Weerheijm J., Schlangen E., van Breugel K. Dynamic behavior of porous concretes under drop weight impact testing. *Cement and Concrete Composites*. 2013. Vol. 39. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.012>.

2. Hao Y., Hao H., Jiang G.P., Zhou Y. Experimental confirmation of some factors influencing dynamic concrete compressive strengths in high-speed impact tests. *Cement and Concrete Research*. 2013. Vol. 52. P. 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.05.008>.

3. Flores-Johnson E.A., Li Q.M. Structural effects on compressive strength enhancement of concrete-like materials in a split Hopkinson pressure bar test. *International Journal of Impact Engineering*. 2017. Vol. 109. P. 408–418. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.08.003>.

4. Hao Y., Hao H., Li Z.X. Influence of end friction confinement on impact tests of concrete material at high strain rate. *International Journal of Impact Engineering*. 2013. Vol. 60. P. 82–106. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.04.008>.

5. Erzar B., Forquin P. An experimental method to determine the tensile strength of concrete at high rates of strain. *Experimental Mechanics*. 2010. Vol. 50. No 7. P. 941–955. DOI: 10.1007/s11340-009-9284-z.

6. Al-Salloum Y., Almusallam T., Ibrahim S.M., Abbas H., Alsayed S. Rate dependent behavior and modeling of concrete based on SHPB experiments. *Cement and Concrete Composites*. 2015. Vol. 55. P. 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.011>.

7. Pedersen R.R., Simone A., Sluys L.J. Mesoscopic modeling and simulation of the dynamic tensile behavior of concrete. *Cement and Concrete Research*. 2013. Vol. 50. P. 74–87. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.03.021>.

8. Hyo-Gyoung Kwak, HanGul Gang. An improved criterion to minimize FE mesh-dependency in concrete structures under high strain rate conditions. *International Journal of Impact Engineering*. 2015. Vol. 86. P. 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.07.008>.

9. Navas P., Yu R.C., B. Li B., Ruiz G. Modeling the dynamic fracture in concrete: an

eigensoftening meshfree approach. *International Journal of Impact Engineering*. 2018. Vol. 113. P. 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.11.004>.

10. Pereira L.F., Weerheijm J., Sluys L.J. Simulation of compaction and crushing of concrete in ballistic impact with a new damage model. *International Journal of Impact Engineering*. 2018. Vol. 111. P. 208–221. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.09.014>.

11. Xiao J., Li L., Shen L., Poon C.S. Compressive behaviour of recycled aggregate concrete under impact loading. *Cement and Concrete Research*. 2015. Vol. 71. P. 46–55. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.01.014>.

12. Guo Y.B., Gao G.F., Jing L., Shim V.P.W. Response of high-strength concrete to dynamic compressive loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2017. Vol. 108. P. 114–135. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.04.015>.

13. Kettenbeil C., Ravichandran G. Experimental investigation of the dynamic behavior of metaconcrete. *International Journal of Impact Engineering*. 2018. Vol. 111. P. 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.09.017>.

14. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading. *Proceedings of the Physical Society. Section B*. 1949. Vol. 62. No 11. P. 676–700. <http://dx.doi.org/10.1088/0370-1301/62/11/302>.

15. Брагов А.М., Игумнов Л.А., Ломунов А.К. *Высокоскоростная деформация мелкозернистого бетона и фибробетона*. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2015. 269 с.

16. Брагов А.М., Ломунов А.К. *Использование метода Кольского для исследования процессов высокоскоростного деформирования материалов различной физической природы*. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2017. 148 с.

17. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Ломунов А.К. *Экспериментально-теоретическое исследование процессов высокоскоростного деформирования и разрушения материалов различной физической природы с использованием метода Кольского и его модификаций*. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2018. 187 с.

18. Брагов А.М., Ломунов А.К., Константинов А.Ю., Ламзин Д.А. Модификация метода Кольского для испытаний хрупких материалов на растяжение. *Приволжский научный журнал*. 2016. №2. С. 9–17. <https://elibrary.ru/item.asp?id=26248585>.

19. Rodriguez T., Navarro C., Sanchez-Galvez V. Splitting tests: an alternative to determine the dynamic tensile strength of ceramic materials. *Journal de Physique IV*. 1994. Vol. 4. P. 101–106. <https://doi.org/10.1051/jp4:1994815>.

20. Ламзин Д.А. Определение прочности на срез бетонов при динамическом нагружении. *Сб. тр. аспирантов, магистрантов и соискателей. Технические науки*. Н. Новгород: ННГАСУ, 2012. С. 31–35.

#### References

1. Ozbek A.S.A., Weerheijm J., Schlangen E., van Breugel K.. Dynamic behavior of porous concretes under drop weight impact testing. *Cement and Concrete Composites*. 2013. Vol. 39. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.012>.

2. Hao Y., Hao H., Jiang G.P., Zhou Y. Experimental confirmation of some factors influencing dynamic concrete compressive strengths in high-speed impact tests. *Cement Concrete Res*. 2013. Vol. 52. P. 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.05.008>.

3. Flores-Johnson E.A., Li Q.M. Structural effects on compressive strength enhancement of concrete-like materials in a split Hopkinson pressure bar test. *Int. J. Impact Eng*. 2017. Vol. 109. P. 408–418. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.08.003>.

4. Hao Y., Hao H., Li Z.X. Influence of end friction confinement on impact tests of concrete material at high strain rate. *Int. J. Impact Eng*. 2013. Vol. 60. P. 82–106. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.04.008>.

5. Erzar B., Forquin P. An experimental method to determine the tensile strength of concrete at high rates of strain. *Exp. Mech*. 2010. Vol. 50. No 7. P. 941–955. DOI: 10.1007/s11340-009-9284-z.

6. Al-Salloum Y., Almusallam T., Ibrahim S.M., Abbas H., Alsayed S. Rate dependent behavior and modeling of concrete based on SHPB experiments. *Cem. Concr. Compos*. 2015. Vol. 55. P. 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.011>.

7. Pedersen R.R., Simone A., Sluys L.J. Mesoscopic modeling and simulation of the dynamic tensile behavior of concrete. *Cement Concrete Res.* 2013. Vol. 50. P. 74–87. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.03.021>.
8. Hyo-Gyoung Kwak, HanGul Gang. An improved criterion to minimize FE mesh-dependency in concrete structures under high strain rate conditions. *Int. J. Impact Eng.* 2015. Vol. 86. P. 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.07.008>.
9. Navas P., Yu R.C., B. Li B., Ruiz G. Modeling the dynamic fracture in concrete: an eigensoftening meshfree approach. *Int. J. Impact Eng.* 2018. Vol. 113. P. 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.11.004>.
10. Pereira L.F., Weerheijm J., Sluys L.J. Simulation of compaction and crushing of concrete in ballistic impact with a new damage model. *Int. J. Impact Eng.* 2018. Vol. 111. P. 208–221. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.09.014>.
11. Xiao J., Li L., Shen L., Poon C.S. Compressive behaviour of recycled aggregate concrete under impact loading. *Cement Concrete Res.* 2015. Vol. 71. P. 46–55. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.01.014>.
12. Guo Y.B., Gao G.F., Jing L., Shim V.P.W. Response of high-strength concrete to dynamic compressive loading. *Int. J. Impact Eng.* 2017. Vol. 108. P. 114–135. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.04.015>.
13. Kettenbeil C., Ravichandran G. Experimental investigation of the dynamic behavior of metaconcrete. *Int. J. Impact Eng.* 2018. Vol. 111. P. 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.09.017>.
14. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading. *Proc. Phys. Soc. B.* 1949. Vol. 62. No 11. P. 676–700. <http://dx.doi.org/10.1088/0370-1301/62/11/302>.
15. Bragov A.M., Igumnov L.A., Lomunov A.K. *Vysokoskorostnaya deformatsiya melkozernistogo betona i fibrobetona [High-Speed Deformation of Fine-Grained Concrete and Fiber-Reinforced Concrete]*. N. Novgorod. NNGU Publ. 2015. 269 p. (In Russian).
16. Bragov A.M., Lomunov A.K. *Ispolzovanie metoda Kolskogo dlya issledovaniya protsessov vysokoskorostnogo deformirovaniya materialov razlichnoy fizicheskoy prirody [Using the Kolsky Method to Study the Mechanisms of High-Rate Deformation of Materials of Physical Nature]*. N. Novgorod. NNGU Publ. 2017. 148 p. (In Russian).
17. Bragov A.M., Konstantinov A.YU., Lomunov A.K. *Eksperimentalno-teoreticheskoe issledovanie processov vysokoskorostnogo deformirovaniya i razrusheniya materialov razlichnoy fizicheskoy prirody s ispolzovaniem metoda Kolskogo i ego modifikacij [Experimental and Theoretical Study of the Processes of High-Speed Deformation and Fracture of Materials of Various Physical Nature Using the Kolsky Method and its Modifications]*. N. Novgorod. NNGU Publ. 2018. 187 p. (In Russian).
18. Bragov A.M., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A. Modifikatsiya metoda Kolskogo dlya ispytaniy khрупkikh materialov na rastyazhenie [Modification of the Kolsky method for tensile testing of brittle materials]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]*. 2016. No 2. P. 9–17. <https://elibrary.ru/item.asp?id=26248585> (In Russian).
19. Rodriguez T., Navarro C., Sanchez-Galvez V. Splitting tests: an alternative to determine the dynamic tensile strength of ceramic materials. *J. Phys. IV France.* 1994. Vol. 4. P. 101–106. <https://doi.org/10.1051/jp4:1994815>.
20. Lamzin D.A. Opredelenie prochnosti na srez betonov pri dinamicheskom nagruzhении [Determination of the shear strength of concrete under dynamic loading]. *Sbornik trudov aspirantov, magistrantov i soiskateley. Tekhnicheskie nauki [Collection of Works of Postgraduates, Undergraduates and Applicants. Technical Science]*. N. Novgorod. NNGASU Publ. 2012. P. 31–35 (In Russian).

## COMPREHENSIVE STUDY OF THE PROPERTIES OF FINE-GRAINED CONCRETE UNDER DYNAMIC TENSION AND SHEAR

Gonov M.E.

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

An experimental study of the dynamic properties of fine-grained concrete under tensile and shear stresses has been carried out. A comprehensive study of the dynamic properties of concrete allows obtaining experimental data and constants. These data and constants are needed to equip dynamic strain and fracture models. The system of experiments is based on modifications of the Kolsky method. This system of experiments allows one to determine a wide range of strength and time characteristics of concrete under shock loading. The experimental setup according to the Kolsky method includes a system of measuring rods between which a test sample is installed, a gas gun for accelerating a cylindrical striker, strain gauges, a speed meter, recording and computing equipment with a software package. Conducted dynamic tests of concrete in a wide range of deformation rates ( $10^2$ – $10^4$  s<sup>-1</sup>). In experiments on direct tension and to determine the ultimate tensile stress of fine-grained concrete during splitting, two speed modes are implemented. In tests of shear strength, a modification of the Hopkinson split bar method was used to determine the dynamic shear strength, in which a sample made of the material under study is located in a rigid holder cut at an angle to the sample axis. The pulse recorded in the reference dipstick is used to plot the shear stress in the sample over time. Shear tests were carried out for three speeds. The results of the performed experiments on tensile, splitting and shearing are presented in the form of diagrams of stress versus deformation and stress versus time. The obtained characteristics can be used to equip computational experiments in the study of the strength of concrete structures subjected to dynamic influences.

*Keywords:* dynamic strength, stress, deformation, strain rate, concrete, dynamic tests, Kolsky method, experiment.