

Динамические свойства бетона марки В45 при ударном нагружении

© П.О. Петров,^{1,3} А.С. Савиных,² Г.В. Гаркушин,² И.А. Жуков,¹ А.А. Козулин,¹ С.В. Разоренов²

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050 Томск, Россия

²Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия

³ООО „Союзбетон“,
634024 Томск, Россия
e-mail: kozulyn@ftf.tsu.ru

Поступило в Редакцию 19 июня 2025 г.

В окончательной редакции 7 августа 2025 г.

Принято к публикации 7 августа 2025 г.

Представлены результаты исследования разрушения цилиндрических образцов тяжелого бетона марки В45 диаметром 105 mm и длиной от 25 до 500 mm при ударном сжатии. Входящий в образцы бетона импульс сжатия амплитудой 3.8 GPa создан с помощью взрывных плосковолновых генераторов ударных волн. В экспериментах осуществлена непрерывная регистрация волновых профилей лазерным интерферометром VISAR. Построены зависимости затухания импульса сжатия от длины образца. Определены значения динамической прочности бетона на сжатие и растяжение (откольная прочность). Получено значение коэффициента динамического упрочнения тяжелого бетона В45.

Ключевые слова: тяжелый бетон, ударная волна, интерферометр VISAR, прочность, сжатие, растяжение, коэффициент динамического упрочнения.

DOI: 10.61011/JTF.2026.03.62536.149-25

Введение

В настоящее время бетоны являются безальтернативным материалом для строительства крупногабаритных несущих и защитных конструкций, работающих в условиях как статических, так и интенсивных динамических нагрузок, за счет своих особых физико-механических свойств, доступности и относительно невысокой стоимости компонентов. Тяжелый бетон представляет собой композиционный материал, в котором конгломерат, состоящий из частиц наполнителя в виде щебня, крошки, песка скреплен в монолит цементным камнем. Дополнительно для предотвращения растрескивания и повышения прочности бетонов при его изготовлении достаточно часто добавляют в смесь различные виды арматуры и волокон, имеющих различную форму, размеры и состав (металлы, полимеры и т.д.) [1–6].

Проблема описания динамических прочностных свойств бетонов связана с необходимостью расчетного прогноза поведения строительных конструкций при взрыве, высокоскоростном ударе и других интенсивных импульсных воздействиях [7–9], а исследования динамической прочности в основном нацелены на определение соответствующей скоростной зависимости прочности [10]. Бетоны относятся к хрупким материалам, для которых прочность на растяжение во много раз меньше прочности на сжатие, а пластическая деформация перед разрушением незначительна или отсутствует. Наиболее часто используемым в мировой практике экспериментальным методом по оценке прочности конструкцион-

ных материалов при скоростях деформации до 10^3 s^{-1} , является модификация метода Кольского с применением разрезного стержня Гопкинсона [11]. В работе [12] представлена серия результатов экспериментально-теоретических исследований прочностных свойств хрупких материалов, в частности, мелкозернистого бетона, в том числе перспективных фибробетонов. В настоящее время разработаны и реализованы методики испытания бетонов в условиях нагружения на стержне Гопкинсона, различающиеся способами генерации нагрузок, характерными размерами исследуемых образцов и учетом их структуры.

Для исследования прочности хрупких материалов в условиях взрывного воздействия или высокоскоростного удара (керамики, минералы, стекла) при скоростях деформации более чем 10^4 s^{-1} используются методы ударно-волновых измерений [13]. При таких условиях нагружения наиболее информативным методом получения информации о сопротивлении испытуемых образцов высокоскоростному деформированию и разрушению является метод, основанный на регистрации и последующем анализе эволюции (формоизменений) волны сжатия по мере ее распространении по материалу. В проведенных экспериментах на легкогазовой пушке [14] в области упругого сжатия были определены значения откольной прочности (15–41 MPa) бетонов толщиной 12.7 mm с разной фракцией гравия. Заметное влияние скорости деформации на динамическое поведение сухого и водонаполненного бетона показано в работе [15]. На основании затухания ударной волны при ее распространении

в образцах $\varnothing 52\text{ mm}$ и толщиной 8.84 mm была дана оценка вязкости бетона в диапазоне давлений ударного сжатия 1.5 до 3.5 GPa [16]. В работах [17,18] проведена серия экспериментов по определению максимальных сдвиговых напряжений на образцах бетона $\varnothing 65\text{ mm}$ и толщиной 20 mm . Показано, что прочность на сдвиг в основном зависит не от наполнителей бетона, а от самой матрицы. Авторы работы [19] показали отсутствие влияния размера наполнителя на ход ударной адиабаты в диапазоне напряжений сжатия от 3 до 23 GPa .

Необходимо отметить, что недостатками ранее проведенных исследований бетонов является ограниченность допустимых размеров образцов [14,16–18,20], что в большинстве случаев делает их применимым только для мелкозернистых бетонов. Маленькие размеры образцов испытуемых бетонов не приемлемы для масштабирования полученных свойств на реальные элементы конструкций и не удовлетворяют требованиям представительности объемов для материалов с крупными включениями. В случае исследований динамических свойств привычных крупно-фракционных материалов, таких как тяжелые бетоны с крупными наполнителями, актуальным остается использование альтернативных методов испытаний [21,22].

Целью настоящей работы было определение прочностных свойств образцов тяжелого бетона B45 (C35/45) при сжатии и растяжении в условиях взрывного нагружения с использованием габаритных цилиндрических образцов.

1. Исследуемый материал

Цилиндрические образцы тяжелого бетона изготавлены в условиях лаборатории бетонного завода ООО „Союзбетон“, г. Томск. Технологический рецепт для изготовления бетонной смеси назначался согласно ГОСТ 27006-2019 и включал в себя связующий компонент Портландцемент ЦЕМ 0 42.5Н (изготовитель ООО „Топкинский цемент“) — 380 kg , шлак ECOFIL-480 — 130 kg , песок для строительных работ — 700 kg , щебень из плотных горных пород фракцией $5\text{--}10\text{ mm}$ — 1055 kg , очищенная вода затворения — 190 kg , а также улучшающие добавки. Подготовленную бетонную смесь заливали в формы в виде пластиковой трубы $\varnothing 105\text{ mm}$, длиной 500 mm с последующим непрерывным уплотнением на вибрационном столе. Дополнительно была изготовлена партия образцов в виде кубов размерами $100 \times 100 \times 100\text{ mm}$ для оценки статической прочности на сжатие и таблеток $\varnothing 105\text{ mm}$, толщиной 200 mm на растяжение. До полного набора прочности образцы выдерживались в условиях лаборатории более 28 дней. На рис. 1 представлено изображение среза цилиндрической заготовки. Видно, что щебень распределен равномерно по поверхности, из чего сделан вывод о его гомогенном распределении по объему.

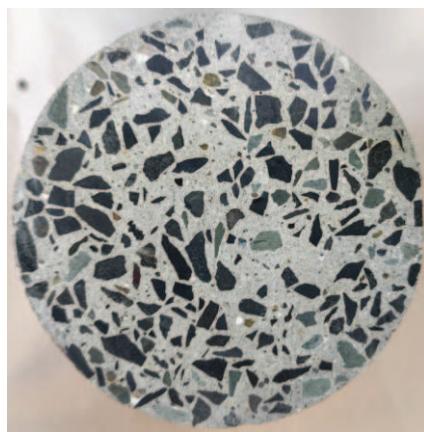


Рис. 1. Изображение отшлифованной поверхности среза заготовки бетона $\varnothing 105\text{ mm}$.

Крупных пор и воздушных карманов на срезе (рис. 1) не наблюдается.

Методом гидростатического взвешивания на аналитических весах МЕ204Т („Mettler Toledo“) была определена плотность бетона $\rho_0 = 2460\text{ kg/m}^3$. С целью предотвращения насыщения водой образцы перед измерениями покрывали тонким слоем клея поливинилакетата (ПВА). Значения продольной и сдвиговой скорости звука были измерены ультразвуковым методом с частотой преобразователей 2.5 MHz и составили $c_l = (4663 \pm 0.03)\text{ m/s}$ и $c_s = (2532 \pm 0.03)\text{ m/s}$ соответственно. Измерения проводились на образцах длиной 25 mm . Объемная скорость звука c_b вычислялась с помощью соотношения $c_b = \sqrt{c_l^2 - 4c_s^2/3} = (3633 \pm 0.05)\text{ m/s}$.

2. Методики экспериментов

Эксперименты по оценке характеристик статической прочности при сжатии и растяжении проведены на испытательном прессе ТП-1-1500 по ГОСТ 10180-2012 в заводской лаборатории ООО „Союзбетон“ (г. Томск) со скоростью нагружения 0.6 MPa/s при осевом сжатии кубов и радиальном сжатии таблеток $\varnothing 105\text{ mm}$, толщиной 200 mm по типу Бразильского теста [23]. Статическая прочность полученного бетона на сжатие оказалась равной 59 MPa , что соответствует классу тяжелого бетона B45, а прочность на растяжение — 8 MPa .

Цилиндрические образцы для ударно-волновых экспериментов длиной 200, 100, 70, 50, 35 и 25 mm вырезали из заготовок длиной 500 mm с помощью алмазной пилы. Для обеспечения плоскопараллельности образцов торцевые поверхностишлифовались и полировались алмазной чашкой. Для определения значения динамической прочности образцов исследуемого бетона проводили эксперименты по взрывному нагружению согласно методикам [21,22,24] на оригинальном оборудовании ФИЦ ПХФ и МХ РАН.

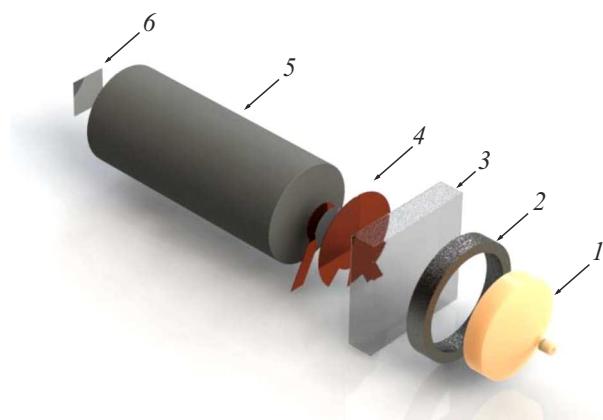


Рис. 2. Модельное представление разнесенных компонент экспериментальной сборки для ударно-волнового эксперимента. (Пояснения в тексте.)

На рис. 2 показана модельная схема сборки для ударно-волнового эксперимента. Ударная волна в образце создавалась детонацией плосковолнового генератора ударных волн 1 диаметром 100 mm, помещенного в стальное обтюрирующее кольцо 2 высотой 27 mm и толщиной стенок 20 mm, для получения требуемого давления и длительности импульса ударного сжатия. Ударная волна проходила в образец 5 через экран 3 (ослабитель детонационной волны) из полиметилметакрилата (ПММА) толщиной 27 mm. Применение экрана ведет к понижению амплитуды импульса ударного сжатия, формирующегося взрывной линзой. Длительность импульса сжатия на выходе из ослабителя составляет более 10 μ s. Давление ударного сжатия составляло 3.8 GPa. Между экраном (ослабителем) и образцом помещался поляризационный датчик 4, используемый как отметчик времени входа ударной волны в бетонный образец, для измерения скорости прохождения импульса ударного сжатия через образец. Датчик представляет собой сэндвич из плотно прижатых друг к другу медной фольги (50 μ m) — скотча (45 μ m) — медной фольги (50 μ m). Диаметр скотча 45 mm. Принцип работы подобных датчиков получил в литературе название „ударная поляризация“ [25]. С скачком давления между обкладками (в нашем случае это медь, заполненная полярным диэлектриком — скотчем) при достижении датчика ударной волной сопровождается появлением ЭДС во внешней цепи. Уровень сигнала в этих опытах достигал величины порядка 1 V.

В экспериментах проводилась непрерывная регистрация профилей скорости свободной поверхности образцов $u_{fs}(t)$ с помощью лазерного допплеровского интерферометрического измерителя скорости VISAR [26]. Для отражения зондирующего лазерного излучения от поверхности образца на его торец с помощью эпоксидной смолы наклеивалась алюминиевая фольга 6 толщиной 400 μ m.

3. Результаты ударно-волновых экспериментов

На рис. 3 показаны суммированные профили скорости свободной поверхности образцов бетона В45 длиной от 25 до 500 mm. В образцах бетона длиной 25–70 mm регистрируется расщепление ударной волны на упругую, распространяющуюся со скоростью U_{el} , и пластическую, имеющую скорость U_{pl} . Несмотря на значительную длительность исходного импульса ударного сжатия (более 10 μ s) на входе в образец, измерения показывают значительное падение амплитуды пластической волны по мере распространения волны сжатия в бетоне. Регистрируемое на волновых профилях падение амплитуды входящей волны наблюдается не только в пластической области деформирования у образцов длиной 25–70 mm, но и при дальнейшем распространении упругой волны по образцу длиной до 500 mm. По мере затухания увеличивается ширина фронта пластической волны сжатия. С скачком параметров на фронте предвестника не фиксируется, вместо него наблюдается плавное нарастание скорости в упругой области, откуда следует, что материал не имеет четко выраженного динамического предела упругости. Пластическая деформация начинается на самых ранних стадиях сжатия и сопровождается деформационным упрочнением. Такое поведение типично для бетонов [12]. Определенный вклад в упрочнение дает схлопывание существующих в объеме образца микропор при ударном сжатии бетона.

Напряжение сжатия за фронтом упругого предвестника σ_{HEL} соответствует динамическому пределу упругости бетона в условиях одноосного сжатия и рассчитывается с помощью соотношения

$$\sigma_{HEL} = \rho_0 c u_{HEL}/2, \quad (1)$$

где $c = 3957$ m/s — скорость распространения упругой волны, рассчитанная по средней ее части, так как

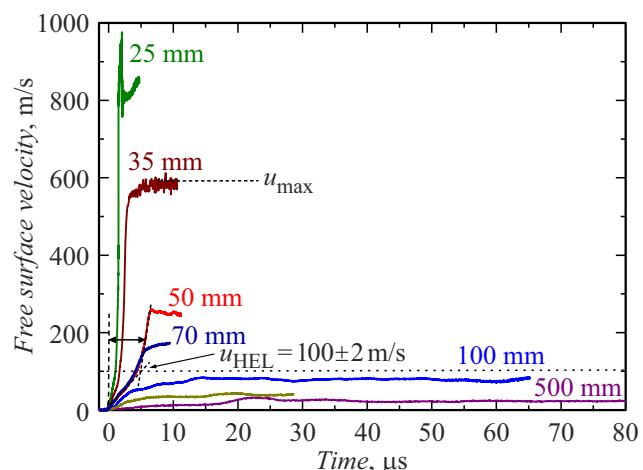


Рис. 3. Экспериментальные профили скорости свободной поверхности бетонных образцов В45 длиной от 25 до 500 mm, где цифрами показаны номинальные длины образцов.

упругая волна размывается по мере распространения, u_{HEL} — амплитуда упругой волны (рис. 3). Рассчитанное среднее значение σ_{HEL} составило (476 ± 30) МПа. Разброс полученных значений σ_{HEL} , вероятно, связан со сложной композитной структурой образцов и присутствующими в объеме образца микронеоднородностями. Измеренное значение динамического предела упругости в работе [14] на образцах бетона толщиной 12.74 mm составило 550 МПа.

Максимальные напряжения сжатия в пластической области деформирования для образцов 25–70 mm можно оценить из соотношения [27]:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{HEL} + \rho_{el} U_{pl} \frac{(u_{\max} - u_{HEL})}{2}, \quad (2)$$

где ρ_{el} — плотность в упругой области, рассчитываемая как

$$\rho_{el} = \frac{\rho_0 U_{pl}}{\left(U_{pl} - \frac{u_{HEL}}{2} \right)}. \quad (3)$$

Для вычисления скорости волны U_{pl} воспользуемся соотношением [13]:

$$U_{pl} = \frac{h_s}{\left(\frac{h_s}{c_l} + \Delta t \right)}, \quad (4)$$

где Δt — разница по времени между выходом на свободную поверхность средней части пластической части волны сжатия и упругой части волны сжатия (рис. 3). Скорость пластической волны U_{pl} не зависит от толщины образца за исключением эксперимента с образцом 50 mm, в котором получено меньшее значение U_{pl} , что, вероятнее всего, связано со сложной негомогенной структурой образцов. Максимальные напряжения сжатия оценены из профиля скорости свободной поверхности в упругой области деформирования для образцов 100–500 mm с помощью соотношения

$$\sigma_{\max} = \rho_0 c \frac{u_{\max}}{2}. \quad (5)$$

На рис. 4 представлена зависимость максимального напряжения сжатия от толщины образцов бетона B45. Полученная зависимость делится на два участка: начальный участок быстрого затухания I — область пластического деформирования, где происходит разрушение материала, и последующий участок затухания II упругой волны, сопровождаемый диссипативными явлениями. Достижение напряжения упругопластического перехода при затухании волны сжатия происходит на толщине образца чуть меньше 100 mm. При этом происходит падение максимального напряжения сжатия на порядок. При дальнейшем распространении упругой волны в стержне регистрируется уменьшение σ_{\max} в 3 раза. В работе [16] было зарегистрировано существенное затухание ударной волны с 2.5 до 0.5 GPa с увеличением толщины образцов бетона до 18 mm, когда длительность входящего импульса сжатия не превышала 1 μ s. В табл. 1

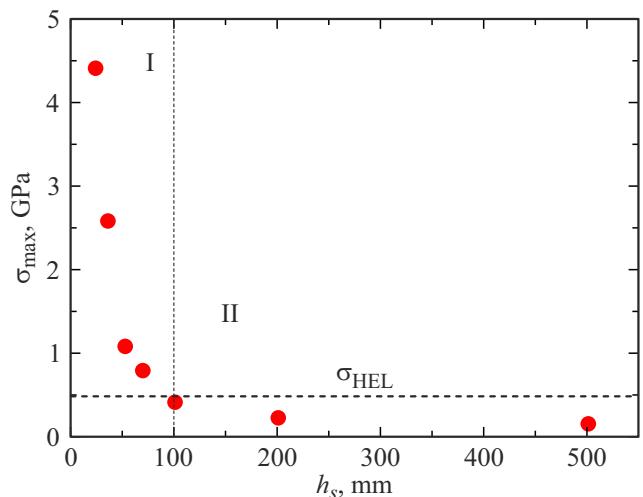


Рис. 4. Зависимости максимального напряжения сжатия (σ_{\max}) от длины образца (h_s).

суммированы экспериментальные и расчетные данные, полученные в ходе ударно-волновых испытаний образцов бетона B45.

4. Динамическая прочность при растяжении и сжатии

На рис. 5 представлена фотография сохранившихся фрагментов образца длиной 500 mm после ударно-волнового нагружения. Визуальный анализ фрагментов сохраненного образца бетона B45 после разрушения показал, что по всей длине 500 mm имеет место два типа разрушения, вызванные как растяжением (откольное разрушение), так и сжатием. На фотографии видно, что при растяжении произошло раскалывание образца в нескольких местах перпендикулярно оси стержня. Измеренная толщина откольного фрагмента L_{sp} , близкого к концу стержня, составила 60–70 mm.

При этом наблюдается разрушенный слой между 70 и 100 mm от торца бетонного стержня. Торец не сохранился. Установлено, что разрушение при сжатии отличается от разрушения при растяжении формой фрагментов, обращенной в направлении распространения ударной волны. Сохранившиеся блоки не имеют остаточных следов пластической деформации. Визуальный анализ фрагментов показал, что разрушение бетонного образца произошло на расстоянии L_1 (200 mm) с образованием конусной формы в начале стержня без образования продольных трещин в оставшиеся части. Напряжение сжатия на расстоянии 200 mm соответствует величине динамической прочности бетона B45 на сжатие [21,22]. Как видно из рис. 5, разрушение образца на расстоянии L_2 (100 mm) полное.

В процессе регистрации профилей скорости свободной поверхности бетонных образцов длиной 100 и

Таблица 1. Результаты экспериментов с бетоном В45

Обозначение	h_s , mm	u_{HEL} , m/s	σ_{HEL} , MPa	u_{max} , m/s	σ_{max} , GPa
25 mm	23.95	102.7	499	975.1	4.41
35 mm	35.9	92.2	447	576.7	2.58
50 mm	52.7	101.3	492	258.5	1.08
70 mm	69.8	96.1	467	168.3	0.79
100 mm	101.0	—	—	84.6	0.411
200 mm	201.0	—	—	46.2	0.224
500 mm	501.5	—	—	31.3	0.152

Примечание. h_s — измеренная длина образца, u_{HEL} — амплитуда упругой волны, σ_{HEL} — динамический предел упругости, u_{max} — максимальная скорость на профиле $u_{fs}(t)$, σ_{max} — максимальное напряжение сжатия.

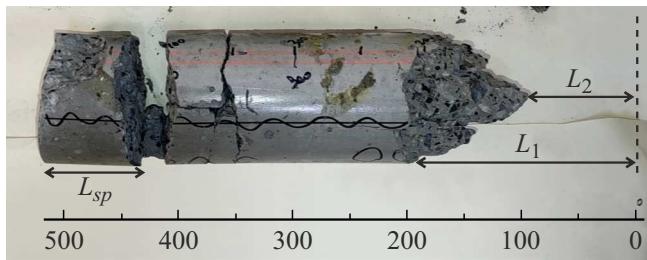


Рис. 5. Фрагменты цилиндрического образца бетона В45 длиной 500 mm после испытаний.

200 mm (рис. 6) фиксируются признаки откольного разрушения в виде выхода на поверхность образца части волны разрежения. Выход волны разрежения на поверхность возможен только в случае сохранения целостности структуры образца. Максимальная скорость свободной поверхности для образцов длиной 100 и 200 mm составила 84.6 и 46.2 m/s соответственно, что ниже величины $u_{HEL} = (100 \pm 2)$ m/s, т. е. измерения проведены в упругой области. При превышении динамического предела упругости $\sigma_{HEL} = 467$ MPa и максимального напряжения сжатия $\sigma_{max} = 411$ MPa бетон начинает разрушаться при сжатии, о чем свидетельствуют волновые профили, полученные для образцов длиной менее 100 mm (рис. 3). Признаков откольного разрушения образцов в области пластического деформирования не наблюдается (рис. 3). Подобное поведение характерно для хрупких материалов, таких как, например, сапфир [28]. В работах [21,22] подобным способом были получены значения динамической прочности при сжатии двух видов бетона. Наклон градиента скорости в упругой волне сжатия в эксперименте с образцом длиной 70 mm аналогичен наклону в эксперименте с образцом длиной 100 mm (рис. 3), следовательно, можно предположить, что скорости деформирования в упругой волне близки. Соответствующая скорость деформирования может быть

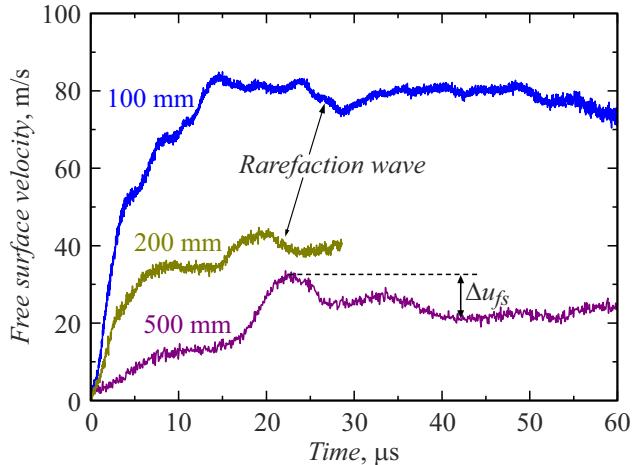


Рис. 6. Увеличенные профили скорости свободной поверхности бетонных образцов В45 длиной 100, 200 и 500 mm. Цифрами показаны номинальные длины образцов. Стрелки указывают на выход части волны разрежения.

определенна по соотношению

$$\frac{\dot{V}}{V_0} = \frac{\dot{u}_{fsc}}{2c} \sim 2200 \text{ s}^{-1}, \quad (6)$$

где \dot{u}_{fsc} — градиент скорости в волне сжатия.

Коэффициент динамического упрочнения (КДУ) бетона В45 представляет собой отношение значения прочности при сжатии 411 MPa в динамических условиях нагружения к прочности при сжатии в статических условиях нагружения — 59 MPa. КДУ бетона В45 при сжатии составляет величину порядка 6–7, что согласуется с данными, представленными в работе [12].

Декремент скорости поверхности Δu_{fs} (рис. 6) — разница между максимальным и минимальным значениями скорости свободной поверхности в волне разгрузки перед откольным разрушением, пропорционален величине разрушающих напряжений — откольной прочности материала. В линейном акустическом приближении

Таблица 2. Динамическая прочность при растяжении

Обозначение	h_s , мм	Δu_{fs} , м/с	σ_{sp} , МПа	\dot{V}/V_0 , с ⁻¹
100 mm	101.0	7.3	35.4	92
200 mm	201.0	4.8	23.3	126
500 mm	501.5	7.4	35.9	75

Примечание. Δu_{fs} — разница между максимальным и минимальным значениями скорости свободной поверхности в волне разгрузки (рис. 6), σ_{sp} — откольная прочность, V/V_0 — скорость деформации в волне разрежения перед отколом.

величина растягивающих напряжений, действующих в момент отрыва откольной пластины, рассчитывается из соотношения

$$\sigma_{sp} = \rho_0 c \frac{\Delta u_{fs}}{2}, \quad (8)$$

где Δu_{fs} — разница между максимальным и минимальным значениями скорости свободной поверхности в волне разгрузки. Из профилей скорости свободной поверхности (рис. 6) вычисляем толщину откольной пластины с помощью соотношения [29]:

$$h_{sp} = \frac{\Delta t_{sp}}{\left(\frac{1}{c} + \frac{1}{U_{el}}\right)}, \quad (9)$$

где $\Delta t_{sp} = 30-40 \mu\text{s}$ — длительность импульса нагружения образца длиной 500 mm (время между окончанием откольного разрушения и отражением волны сжатия от свободной поверхности). Проведенный расчет толщины откольной пластины показал, что $h_{sp} = 64 \text{ mm}$, что достаточно хорошо совпадает с длиной сохранившегося откольного фрагмента (рис. 5). В табл. 2 суммированы рассчитанные значения откольной прочности от скорости деформирования образцов длиной 100 mm и более.

Погрешность полученных значений прочности при растяжении, а также соответствующих скоростей деформирования, оцениваются в 15%–20%. Наблюдаемый разброс полученных данных связан со сложной структурой образцов и приложенным максимальным напряжением σ_{max} . Можно сделать вывод, что откольное разрушение происходит в упругой области деформирования, и она не зависит от длины образца и максимального напряжения сжатия. Подобные измерения откольной прочности от максимального напряжения сжатия проведены в работе [14], где показано, что величина откольной прочности исследованного бетона с размером наполнителя около 10 mm не зависит от σ_{max} и составляет $\sim 30 \text{ MPa}$ в диапазоне максимальных упругих напряжений сжатия 83–553 MPa. В работе [30] с применением стержней Гопкинсона показано, что откольная прочность бетона с размером наполнителя 0.5–8 mm лежит в диапазоне 7–12 MPa при скоростях деформирования 60–130 s⁻¹. Измерения откольной прочности бетона MB50, проведенные в работе [15], показали, что $\sigma_{sp} = 14-16 \text{ MPa}$. Откольная прочность

бетона, изготовленного с использованием гранитной крошки, равна 8–10 MPa при скоростях деформации 30–50 s⁻¹ [22]. Разброс значений откольной прочности при близких скоростях деформирования объясняется различными составами и способами приготовления исследованных бетонов.

КДУ исследованного бетона при растяжении составляет 3–4, что согласуется с данными о прочности бетонов в работе [12].

Заключение

Экспериментально измерены динамические прочностные характеристики образцов тяжелого бетона В45 в виде стержней $\varnothing 105 \text{ mm}$ длиной от 25 до 500 mm при длительностях импульсов ударной нагрузки более 10 μs . Проведены систематические исследования эволюции импульсов ударного сжатия в стержнях. Показано, что при ударном сжатии в образцах длиной от 25 до 70 mm формируется упругий предвестник с плавным нарастанием напряжения на фронте волны, за которым следует пластическая ударная волна. Наблюдается сильное затухание пластической волны сжатия по мере распространения импульса по образцу, при этом отмечается слабое затухание упругой волны с диссипацией. Измерения параметров импульса сжатия на границе зоны разрушения и параметров упругопластического перехода позволили определить динамическую прочность бетона на сжатие. Оценка напряжения, при котором бетон разрушается при сжатии, находится в диапазоне: сверху — величина $\sigma_{HEL} = 467 \text{ MPa}$, снизу — $\sigma_{max} = 411 \text{ MPa}$ при скорости деформирования $\sim 2200 \text{ s}^{-1}$. Анализ измеренного профиля скорости свободной поверхности образца бетона длиной 500 mm позволил определить толщину сохранившегося откольного фрагмента. Прочность на растяжение составила $\sim 30 \text{ MPa}$ при скорости деформации $\sim 100 \text{ s}^{-1}$. Коэффициент деформационного упрочнения при сжатии составил 6–7, при растяжении — 3–4.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00750, <https://rscf.ru/project/25-29-00750>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] C. Jiao, W. Sun, S. Huan, G. Jiang. Front. Archit. Civ. Eng. China, **3** (2), 131 (2009). DOI: 10.1007/s11709-009-0027-0
- [2] M. Nili, A.H. Ghorbankhani, A. Alavi Nia, M. Zolfaghari. Construction and Building Mater., **107**, 264 (2016). DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.161

- [3] Z. Xu, H. Hao, H.N. Li. *Appl. Mechan. Mater.*, **82**, 112 (2011). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.82.112
- [4] Ю.М. Баженов. *Бетон при динамическом нагружении* (Стройиздат, М., 1970)
- [5] L. Coppola, E. Cadoni, D. Forni, A. Buoso. *Appl. Mechan. Mater.*, **82**, 190 (2011). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.82.190
- [6] A.M. Bragov, A.Y. Konstantinov, D.A. Lamzin, A.K. Lomunov, B.L. Karihaloo, Y.V. Petrov, I.V. Smirnov. *J. Appl. Mechan. Tech. Phys.*, **53** (6), 926 (2012).
- [7] A.M. Bragov, A.K. Lomunov, M.E. Gonov, A.Yu. Konstantinov, L.A. Igumnov, V.A. Eremeyev. *Mater.*, **16** (6), 2259 (2023). DOI: 10.3390/ma16062259
- [8] V.V. Karakulov, I.Y. Smolin, S.N. Kulkov. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1045**, 012018 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/1045/1/012018
- [9] А.В. Радченко, П.А. Радченко. *Ударно-волновые процессы и разрушение в анизотропных материалах и конструкциях* (ТГАСУ, Томск, 2015)
- [10] Н.В. Михайлова, Ю.В. Петров. *Физическая мезомеханика*, **23** (3), 15 (2020).
- [11] Д.А. Ламзин, М.Е. Гонов, А.М. Брагов, А.К. Ломунов. *Вестник ТГУ. Математика и механика*, **81** (97), 97 (2023). DOI: 10.17223/19988621/81/9
- [12] А.М. Брагов, Л.А. Игумнов, А.К. Ломунов. *Высокоскоростная деформация мелкозернистого бетона и фибробетона* (Изд-во Нижегородского ун-та, Нижний Новгород, 2015)
- [13] G.I. Kanel, S.V. Razorenov, V.E. Fortov. *Shock-Wave Phenomena and the Properties of Condensed Matter* (Springer, NY, 2004), DOI: 10.1007/978-1-4757-4282-4
- [14] M.E. Kipp, L.C. Chhabildas, W.D. Reinhart. *AIP Conf. Proc.*, **429**, 557 (1998). DOI: 10.1063/1.55664
- [15] P. Forquin, B. Erzar. *Int. J. Fract.*, **163**, 193 (2010). DOI: 10.1007/s10704-009-9419-3
- [16] j.-Y. Chen, C.-C. Liu, H.-W. Dong, D.-S. Shi, Z.-X. Zhang, D.J. Wang. *Construction and Building Mater.*, **39**, 119 (2013). DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.05.011
- [17] K. Tsemelis, W.G. Proud. *AIP Conf. Proc.*, **845**, 1496 (2006). DOI: 10.1063/1.2263608
- [18] T. Andrews, D.J. Chapman, W.G. Proud. *AIP Conf. Proc.*, **955**, 469 (2007). DOI: 10.1063/1.2833104
- [19] C.A. Hall, L.C. Chhabildas, W.D. Reinhart. *AIP Conf. Proc.*, **429**, 119 (1998). DOI: 10.1063/1.55638
- [20] Y. Al-Salloum, T. Almusallam, S.M. Ibrahim, H. Abbas, S. Alsayed. *Cement & Concrete Composites*, **55**, 34 (2015). DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.07.011
- [21] A.S. Savinykh, G.V. Garkushin, G.I. Kanel, S.V. Razorenov. *Int. J. Fract.*, **209**, 109 (2018). DOI: 10.1007/s10704-017-0244-9
- [22] A.S. Savinykh, G.V. Garkushin, G.I. Kanel, S.V. Razorenov. *Int. J. Fract.*, **215**, 129 (2019). DOI: 10.1007/s10704-018-00342-w
- [23] ASTM C0496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, n. d., West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/C0496_C0496M-17
- [24] Г.И. Канель, С.В. Разоренов, А.В. Уткин, В.Е. Фортов. *Ударно-волновые явления в конденсированных средах* (Янус-К, М., 1996)
- [25] Б.Н. Минеев, А.Г. Иванов. *УФН*, **119** (75), 400 (1976). DOI: 10.3367/UFNr.0119.197605c.0075
- [26] L.M. Barker, R.E. Hollenbach. *J. Appl. Phys.*, **43**, 4669 (1972). DOI: 10.1063/1.1660986
- [27] E.B. Zaretsky, G.I. Kanel. *J. Appl. Phys.*, **117**, 195901 (2015). DOI: 10.1063/1.4921356
- [28] А.С. Савиных, Г.И. Канель, С.В. Разоренов. Письма в ЖТФ, **37** (7), 8 (2011). [A.S. Savinykh, G.I. Kanel, S.V. Razorenov. *Tech. Phys. Lett.*, **37** (7), 294 (2011)]. DOI: 10.1134/S1063785011040146]
- [29] T. Antoun, L. Seaman, D.R. Curran, G.I. Kanel, S.V. Razorenov, A.V. Utkin. *Spall Fracture* (Springer, NY, 2003), DOI: 10.1007/b97226
- [30] P. Forquin, B. Lukić. *J. Dynamic Behavior Mater.*, **4**, 34 (2018). DOI: 10.1007/s40870-017-0135-1