

УДК 691.32

ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ФИБРОБЕТОНА

А. М. Брагов^{*,**}, Б. Л. Карихалу^{***},
Ю. В. Петров^{****}, А. Ю. Константинов^{*},
Д. А. Ламзин^{*,**}, А. К. Ломунов^{*,**}, И. В. Смирнов^{****}

* Научно-исследовательский институт механики Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород

** Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 603950 Нижний Новгород

*** Университет г. Кардиффа, CF10 3XQ Кардифф, Великобритания

**** Санкт-Петербургский государственный университет, 199034 Санкт-Петербург
E-mails: postmaster@mech.unn.ru, yp@YP1004.spb.edu

Представлены результаты динамических испытаний на сжатие и растяжение при раскалывании композитного материала — фибробетона CARDIFRC, выполненных с использованием методики Кольского и ее модификации. Экспериментально определены прочностные и деформационные характеристики фибробетона при высоких скоростях деформации. Показана зависимость механических характеристик от скорости деформации и скорости роста напряжений. На основе структурно-временного подхода дана единая интерпретация скоростных эффектов разрушения испытанного фибробетона. Показано, что и при сжатии, и при растяжении зависимости прочности фибробетона от времени эффективно рассчитываются по критерию инкубационного времени.

Ключевые слова: фибробетон, методика Кольского, сжатие, раскалывание, разрушение, инкубационное время, динамическая прочность.

Введение. В настоящее время одной из главных задач строительной отрасли является увеличение прочности и надежности строительных конструкций при снижении затрат на строительство. Этого можно добиться, используя новые, более совершенные строительные материалы, например фибробетон (бетон с равномерно распределенными по его объему армирующими волокнами). По сравнению с обычным бетоном фибробетон имеет более высокие статическую прочность на сжатие, растяжение и срез, ударную и усталостную прочность, трещиностойкость и вязкость разрушения, морозостойкость, водонепроницаемость, сопротивление кавитации, жаропрочность и пожаростойкость, поэтому он используется прежде всего при возведении сооружений энергетической, атомной промышленности, а также объектов гражданской и военной инфраструктуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 11-08-00545, 10-01-00585, 10-01-00810, 11-01-00491, 10-01-91154-ГФЕН), совместного проекта РФФИ и Лондонского королевского общества (код проекта 08-01-91860-КО), а также в рамках Программы Президиума РАН «Фундаментальные проблемы механики и смежных наук в изучении многомасштабных процессов в природе и технике».

© Брагов А. М., Карихалу Б. Л., Петров Ю. В., Константинов А. Ю., Ламзин Д. А.,
Ломунов А. К., Смирнов И. В., 2012

Ввиду участвовавших в последнее время техногенных и природных катастроф, которые сопровождаются интенсивными ударными и взрывными нагрузками, уже на стадии проектирования зданий и сооружений следует предусмотреть возможность таких динамических воздействий. Для рационального проектирования и анализа работы динамически нагруженных конструкций необходимо исследовать механические свойства материалов, из которых эти конструкции изготовлены, при высоких скоростях деформации. Поэтому изучение поведения современных конструкционных строительных материалов при высокоскоростном деформировании и разрушении является актуальной задачей.

В последние годы широко используется численное моделирование процессов деформирования как конструкций в целом, так и отдельных их элементов в условиях статических и динамических внешних воздействий. При этом реальный материал, обладающий комплексом физико-механических свойств, в расчете заменяется математической моделью. Для использования известных моделей поведения материалов, а также для разработки новых математических моделей требуются экспериментальные данные о динамических свойствах новых конструкционных строительных материалов.

Изучению поведения бетонов и других строительных материалов при динамическом нагружении посвящено большое количество работ. Однако в силу неполноты, а иногда и противоречивости результатов исследований, с одной стороны, и появления новых материалов на основе цемента — с другой, данная задача остается нерешенной. Поэтому в настоящей работе проведено экспериментальное исследование нового перспективного строительного материала — фибробетона CARDIFRC, разработанного и изготовленного в университете г. Кардиффа (Великобритания) [1–4]. Испытанный фибробетон представляет собой мелкозернистый бетон с введенными в его матрицу стальными оцинкованными проволоками. Исследования механических свойств этого материала выполнены с использованием метода Кольского и его модификации. На примере испытаний фибробетона обсуждается одна из основных проблем моделирования динамических прочностных свойств материалов, связанная с зависимостью предельных характеристик от истории и способа приложения нагрузки. Зависимость от способа приложения воздействия проявляется в том, что при варьировании продолжительности действия, амплитуды, скорости нарастания внешнего воздействия и других факторов предельные величины изменяются в диапазоне $100 \div 1000$ %. В статике критическую величину можно считать константой материала (или меняющейся незначительно (в пределах десятков процентов)), в динамике экспериментально определенные критические значения характеристик являются очень неустойчивыми и могут различаться на порядки, вследствие чего динамическое поведение системы, описываемой на основе этих характеристик, часто сложно прогнозировать.

Трудности, возникающие при моделировании указанных выше эффектов динамической прочности, обусловлены прежде всего отсутствием предельного условия, определяющего момент образования разрыва. Данную проблему можно решить, используя подходы структурной макромеханики разрушения и понятие инкубационного времени разрушения, учитывающего кинетические процессы формирования макроразрывов [5, 6]. Указанные выше эффекты становятся значительными, если осуществляется переход от медленных воздействий к кратковременным воздействиям с периодами, длительность которых сравнима с инкубационным временем разрушения, обусловленного подготовительными релаксационными процессами развития микродефектов в структуре материала.

Далее с использованием структурно-временного подхода [5–10], основанного на понятии инкубационного времени разрушения, дается единая интерпретация разрушения фибробетона.

Методики динамических испытаний и применяемое экспериментальное оборудование. В настоящее время наиболее распространенным методом динамических испытаний является метод Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсо-

на (РСГ), что обусловлено его хорошей теоретической обоснованностью и простотой реализации. В данной работе при изучении механических свойств фибробетона использовалась стандартная методика Кольского для испытания материалов в условиях одноосного напряженного состояния, а также ее модификация — динамическое раскалывание [11–13].

Установка для динамических испытаний, реализующая метод РСГ, состояла из пневматического нагружающего устройства (газовая пушка) с системой управления, комплекса измерительно-регистрирующей аппаратуры и сменного комплекта мерных стержней. Измерение деформаций проводилось с помощью наклеенных на боковую поверхность стержней тензодатчиков. Сигналы от тензодатчиков через усилители поступали на многоканальную компьютерную измерительную систему PXI-1042 фирмы National instruments, где в среде инженерного графического программирования NI LabVIEW организованы виртуальные измерительные приборы: измеритель скорости ударника и высокоскоростные двухканальные осциллографы. Полученные в ходе испытаний значения скорости с измерителя и импульсы с мерных стержней визуализировались в виде осциллограмм и сохранялись в цифровом виде в памяти компьютера для последующей обработки с помощью оригинального пакета программ.

Критерий инкубационного времени разрушения. Предложенный в работах [5, 6, 10] критерий инкубационного времени разрушения позволяет рассчитывать наблюдаемые в экспериментах по разрушению твердых тел изменения динамических прочностных характеристик, существенно зависящие от формы, длительности и интенсивности воздействия. Данный критерий можно представить в обобщенном виде

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \left(\frac{F(t')}{F_{cr}} \right)^\alpha dt' \leq 1, \quad (1)$$

где $F(t)$ — интенсивность локального силового поля, вызывающего разрушение среды; F_{cr} — статический предел локального силового поля; τ — инкубационное время, зависящее от релаксационного процесса, подготавливающего разрыв. Время разрушения определяется при выполнении равенства в условии (1). Ударное деформирование имеет две важнейшие характеристики: уровень и скорость приложения нагрузки. Параметры критерия определяют реакцию среды на эти характеристики ввода энергии. Инкубационное время τ характеризует чувствительность среды к скорости приложения нагрузки в данной точке среды (или скорости деформирования), параметр α — чувствительность к уровню (или амплитуде) напряженности локального силового поля, вызывающего разрушение. Часто хорошее соответствие критерия (1) экспериментальным данным удается получить при значении $\alpha = 1$. В этом случае предельное условие (1) можно рассматривать как условие введения за период τ структурно-силового импульса, достаточного для разрушения элементарного объема материала.

Рассмотрим один из возможных способов определения параметра τ при механическом разрыве материала. Предположим, что растягиваемый стандартный образец из данного материала разрывается на две части при напряжении P , которое возникает в некоторый момент времени $t = 0$: $F(t) = PH(t)$, где $H(t)$ — функция Хевисайда. При квазихрупком разрушении происходит разгрузка материала, и локальное напряжение в месте возникновения разрыва быстро (но не мгновенно) падает от значения P до нуля. При этом возникает соответствующая волна разгрузки, которая распространяется по образцу и может быть зарегистрирована известными (например, интерферометрическими или поляризационно-оптическими) методами. История изменения напряжения в месте разрыва условно может быть описана зависимостью $\sigma(t) = P - Pf(t)$, где в течение некоторого временного промежутка T функция $f(t)$ меняется в диапазоне от 0 до 1 (рис. 1). Классической теории прочности соответствует случай $f(t) = H(t)$, т. е. согласно классическому

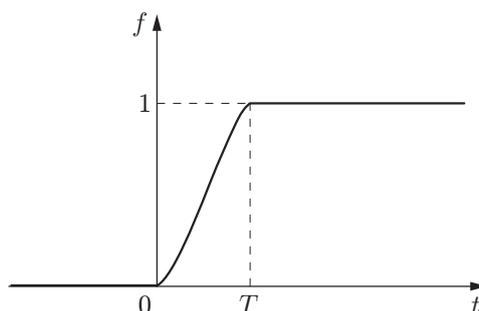


Рис. 1. Кинетическая зависимость разрушения образца в месте разрыва

подходу разрыв происходит мгновенно ($T = 0$). В действительности разрыв материала (образца) представляет собой процесс, протекающий во времени, а функция $f(t)$ описывает переход от условно “бездефектного” состояния $f(0) = 0$ к полностью разрушенному состоянию $f(T) = 1$, совпадающему с макроразрушением в этой точке (см. рис. 1). Применяя в данной ситуации на макроскопическом уровне ($F(t) = PH(t)$) критерий разрушения (1), получаем $T = \tau$ при $P = F_{cr}$, т. е. введенное инкубационное время равно периоду разрушения после достижения напряжением в материале статической прочности на разрыв. Этот период можно измерить в опытах по статическому разрушению образцов различными способами, например путем измерения времени, в течение которого уменьшается напряжение на фронте волны разгрузки, зарегистрированной интерферометрическим или поляризационно-оптическим методом по значениям перемещений точек поверхности образцов. Ниже приводится пример реализации критериального условия (1) в задачах моделирования зависимостей прочности от скорости нагружения фибробетона.

Результаты испытаний на сжатие. С целью построения динамических диаграмм деформирования и исследования влияния скорости деформации и скорости роста напряжений на механические характеристики материала при его разрушении: максимальное напряжение σ_{max} , предельную деформацию ε_{max} (деформация при максимальном напряжении), время до начала разрушения τ_{max} (время “жизни”) — проводились испытания на сжатие.

Эксперименты выполнялись на установке с диаметром мерных стержней 20 мм (РСГ-20). Образцы имели форму цилиндра диаметром приблизительно 15 мм и длиной порядка 10 мм, варьировалась скорость ударника, а также использовались ударники, изготовленные из различных материалов и имеющие разную длину, что позволяло менять амплитуду и длительность нагружающего импульса. Для уменьшения влияния сил трения при радиальном разрушении образца перед испытанием на концы мерных стержней наносился тонкий слой графитовой смазки. Результаты испытаний представлены на рис. 2, 3.

На рис. 2 приведены зависимости напряжения и скорости деформирования от величины деформации при различных средних значениях скорости деформации V . Видно, что на первом участке ветви нагружения происходит рост напряжений и деформаций, а после того как напряжения в образце достигают предельного значения, материал начинает интенсивно разрушаться, при этом образование микро- и макротрещин приводит к существенному снижению уровня напряжений при увеличении деформаций.

Зависимость времени “жизни” от скорости деформации показана на рис. 3. Несмотря на разброс свойств рассматриваемого материала, можно отметить, что при увеличении скорости деформации время “жизни” уменьшается.

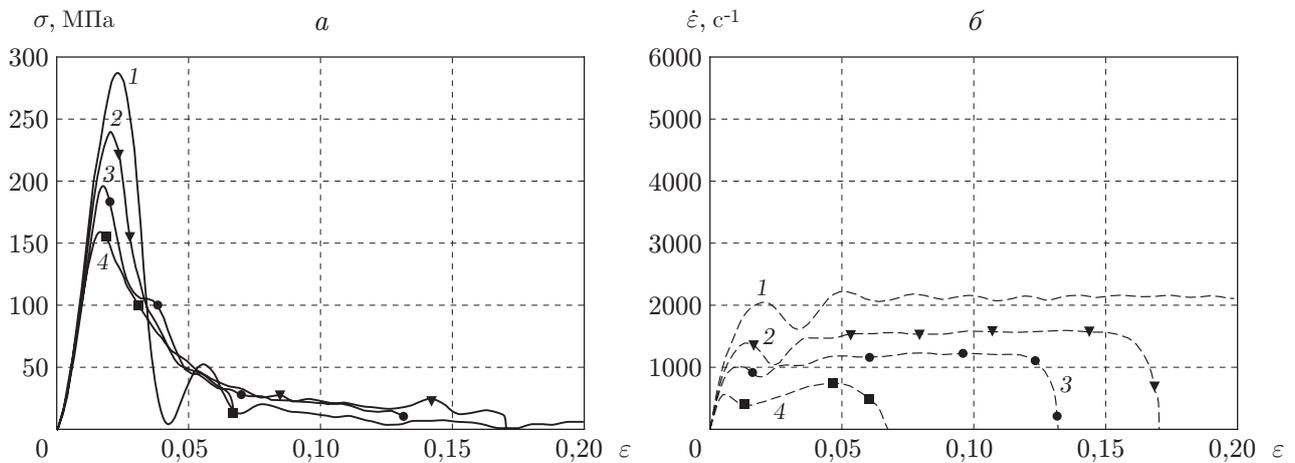


Рис. 2. Зависимости напряжения (а) и скорости деформации (б) от величины деформации при различных средних значениях скорости деформации: 1 — $V = 2000 \text{ c}^{-1}$, 2 — $V = 1300 \text{ c}^{-1}$, 3 — $V = 1000 \text{ c}^{-1}$, 4 — $V = 500 \text{ c}^{-1}$

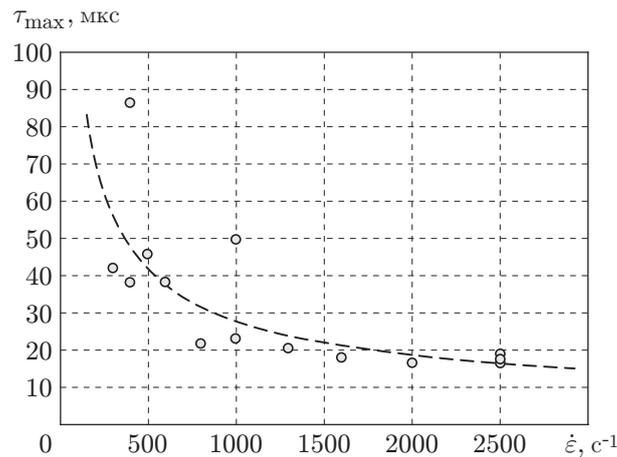


Рис. 3. Зависимость времени “жизни” образца от скорости деформации: точки — эксперимент, линия — аппроксимация экспериментальных данных $\tau_{\max} = 1510,1\dot{\epsilon}^{-0,578}$

Зависимость прочности нагружения от времени можно получить на основе критерия инкубационного времени (1), который в рассматриваемом частном случае разрушения при сжатии принимает вид

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \sigma(t') dt' \leq \sigma_{cr}^{comp}, \quad (2)$$

где $\sigma(t)$ — зависимость среднего сжимающего напряжения в образце от времени; σ_{cr}^{comp} — статическая прочность на сжатие.

Для вычисления зависимости прочности материалов от скорости нагружения можно получить достаточно простые соотношения, которые позволяют находить значения прочности материала для данного характера нагружения и геометрии образца, не выполняя трудоемкие расчеты. В рассматриваемом случае простейшую аналитическую зависимость

прочности от скорости можно получить следующим способом. Согласно рис. 2 до момента разрушения рост сжимающих напряжений можно считать линейным, тогда

$$\sigma(t) = \dot{\sigma}tH(t) = E\dot{\epsilon}tH(t),$$

где $\dot{\sigma}$, $\dot{\epsilon}$ — скорости роста напряжений и деформаций соответственно, которые будем полагать постоянными. Подставим данную функцию напряжения в критерий (2) и найдем значение времени разрушения t_* , соответствующее выполнению в (2) равенства:

$$t_* = \begin{cases} \tau/2 + \sigma_{comp}/(E\dot{\epsilon}), & t_* \geq \tau, \\ \sqrt{2\sigma_{comp}\tau/(E\dot{\epsilon})}, & t_* < \tau. \end{cases}$$

Отсюда следует выражение для предельного напряжения

$$\sigma_* = \sigma(t_*) = \begin{cases} \sigma_{comp} + \dot{\sigma}\tau/2 = \sigma_{comp} + E\dot{\epsilon}\tau/2, & t_* \geq \tau, \\ \sqrt{2E\dot{\epsilon}\sigma_{comp}\tau}, & t_* < \tau. \end{cases}$$

Очевидно, что вследствие разброса экспериментальные значения исследуемых параметров могут существенно отклоняться от данной простейшей зависимости.

Следует отметить, что вследствие влияния способа и истории нагружения зависимость прочности от скорости нестабильна и поэтому не является функцией материала, однако в настоящее время данная зависимость является распространенным конечным результатом многих исследований по динамическому тестированию материалов.

На рис. 4 представлены результаты испытаний на сжатие фибробетона при квазистатических и высоких скоростях деформации в условиях одноосного напряженного состояния. Таким образом, при описанных выше условиях нагружения и скоростях деформации $300 \text{ с}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 2500 \text{ с}^{-1}$ наблюдается увеличение прочности данного материала и соответствующее динамическое упрочнение, которое можно эффективно рассчитать по критерию инкубационного времени.

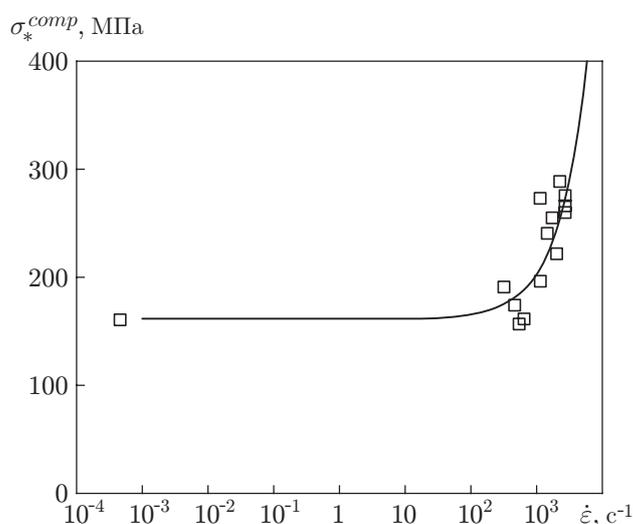


Рис. 4. Зависимость прочности фибробетона от скорости деформации: точки — эксперимент на сжатие, линия — расчет по критерию (2) при $\sigma_{cr}^{comp} = 160 \text{ МПа}$, $\tau = 2 \text{ мкс}$, $E = 46 \text{ ГПа}$

Результаты испытаний на растяжение при раскалывании. Динамические испытания на раскалывание (“бразильский тест”) проведены для определения порогового значения разрушающих напряжений и исследования влияния на растягивающие напряжения скорости их роста. Для этого было реализовано три режима: 1) сохранение целостности образца; 2) частичные повреждения; 3) разрушение. В испытаниях варьировались материал, длина и скорость ударника. Эксперименты проводились на установке РСГ-60 (диаметр мерных стержней 60 мм), а также на установке РСГ-20 (диаметр мерных стержней 20 мм), что позволило получить более высокие скорости роста напряжений. Образцы имели форму цилиндров диаметром ≈ 15 мм и высотой ≈ 10 мм для испытаний на установке РСГ-20 и диаметром ≈ 60 мм и высотой ≈ 30 мм для испытаний на установке РСГ-60. Для уменьшения влияния трения также использовалась смазка концов мерных стержней.

Зависимости напряжения от времени деформирования приведены на рис. 5. Видно, что при частичных повреждениях и полном разрушении образца растягивающие напряжения практически одинаковы.

Расчет динамических предельных растягивающих напряжений может быть проведен с использованием критерия инкубационного времени, который в данном случае принимает вид предложенного в работах [8–10] предельного условия

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \sigma(t') dt' \leq \sigma_{cr}^{tens}, \quad (3)$$

где $\sigma(t)$ — зависимость растягивающего напряжения в центре образца от времени; σ_{cr}^{tens} — статическая прочность на разрыв.

На рис. 6 представлены результаты квазистатических и динамических (на установках РСГ-20 и РСГ-60) испытаний фибробетона на растяжение при раскалывании. Для сравнения на рис. 6 приведены результаты расчета по критерию (3) на основе экспериментальных данных [14] зависимости прочности гранита от скорости нагружения при $\sigma_{cr}^{tens} = 19$ МПа, $\tau = 70$ мкс. Из рис. 6 следует, что при большей статической прочности исследуемый фибробетон обладает меньшей по сравнению с гранитом прочностью при ударном воздействии.

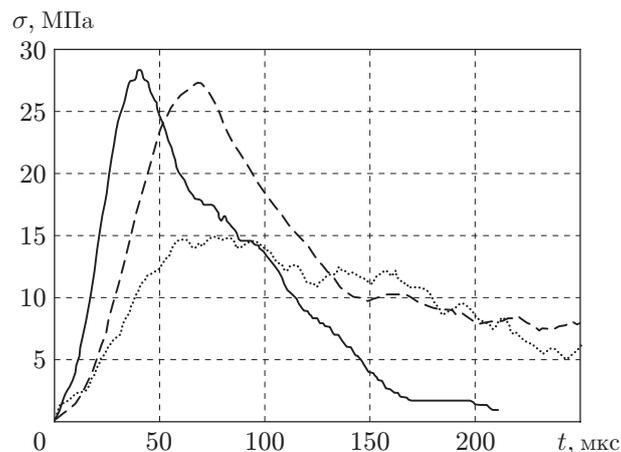


Рис. 5. Зависимости напряжения от времени, полученные при динамических испытаниях фибробетона на растяжение при раскалывании для различных режимов нагружения:

пунктирная линия — режим 1, штриховая — режим 2, сплошная линия — режим 3

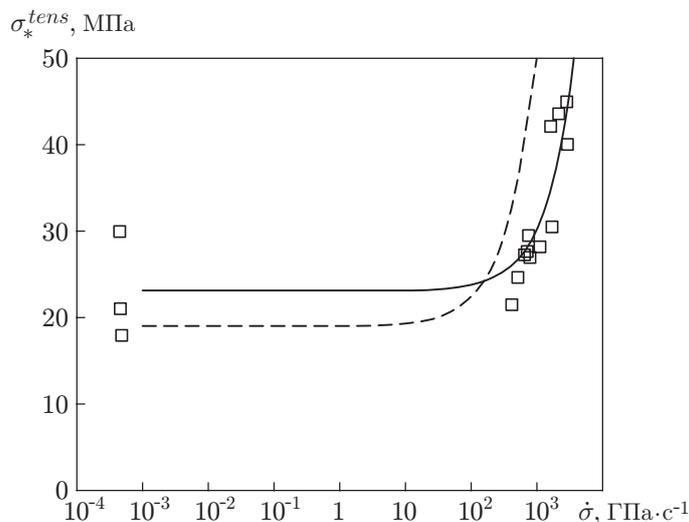


Рис. 6. Зависимости прочности фибробетона и гранита от скорости нагружения: точки — эксперимент на раскалывание фибробетона, линии — расчет по критерию (3) (сплошная кривая — для фибробетона при $\sigma_{cr}^{tens} = 23$ МПа, $\tau = 15$ мкс, штриховая кривая — для гранита при $\sigma_{cr}^{tens} = 19$ МПа, $\tau = 70$ мкс (данные [14]))

В рассматриваемом диапазоне скоростей роста напряжений $5 \cdot 10^5 \text{ МПа} \cdot \text{с}^{-1} \leq \dot{\sigma} \leq 3 \cdot 10^6 \text{ МПа} \cdot \text{с}^{-1}$ наблюдается увеличение прочности данного материала, которое эффективно рассчитывается по критерию инкубационного времени, причем значение инкубационного времени разрушения при растяжении существенно превышает значение этого параметра при сжатии.

Выводы. Проведены испытания фибробетона на сжатие и растяжение при раскалывании с помощью методики Кольского и ее модификации. В результате анализа экспериментальных данных установлено, что при сжатии динамическая прочность увеличивается с ростом скорости деформации и скорости роста напряжений и почти в два раза превышает квазистатическое значение при скорости деформации $\dot{\epsilon} \approx 2500 \text{ с}^{-1}$. Прочность на растяжение при раскалывании исследуемого материала также повышается при увеличении скорости нагружения и почти в два раза превышает квазистатическую величину при скоростях роста напряжений $\dot{\sigma} \approx 3 \cdot 10^6 \text{ МПа} \cdot \text{с}^{-1}$.

Показано, что зависимости прочности фибробетона от времени как при сжатии, так и при растяжении эффективно рассчитываются по критерию инкубационного времени. Построенные на основе структурно-временного подхода скоростные зависимости прочности исследуемого материала хорошо согласуются с экспериментальными данными, причем при растяжении значение инкубационного времени разрушения больше значения этого параметра при сжатии.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории статических испытаний материалов Научно-исследовательского института механики Нижегородского государственного университета за проведение квазистатических испытаний фибробетона и предоставленные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Benson S. D. P., Karihaloo B. L.** CARDIFRC — development and mechanical properties. Pt 1. Development and workability // Mag. Concrete Res. 2005. V. 57. P. 347–352.

2. **Benson S. D. P., Nicolaidis D., Karihaloo B. L.** CARDIFRC — development and mechanical properties. Pt 2. Fibre distribution // *Mag. Concrete Res.* 2005. V. 57. P. 412–432.
3. **Benson S. D. P., Karihaloo B. L.** CARDIFRC — development and mechanical properties. Pt 3. Uniaxial tensile response and other mechanical properties // *Mag. Concrete Res.* 2005. V. 57. P. 433–443.
4. **Nicolaidis D., Kanellopoulos A. D., Karihaloo B. L.** Fatigue life and self-induced volumetric changes of CARDIFRC // *Mag. Concrete Res.* 2010. V. 62. P. 679–683.
5. **Петров Ю. В., Уткин А. А.** О зависимости динамической прочности от скорости нагружения // *Физ.-хим. механика материалов.* 1989. № 2. С. 38–42.
6. **Petrov Y., Morozov N.** On the modeling of fracture of brittle solids // *Trans. ASME. J. Appl. Mech.* 1994. V. 61. P. 710–712.
7. **Morozov N. F.** Dynamics of fracture / N. F. Morozov, Yu. V. Petrov. Berlin; Heidelberg; N. Y.: Springer-Verlag, 2000.
8. **Petrov Y. V., Morozov N. F., Smirnov V. I.** Structural macromechanics approach in dynamics of fracture // *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* 2003. V. 26. P. 363–372.
9. **Петров Ю. В.** “Квантовая” природа динамического разрушения хрупких тел // *Докл. АН СССР.* 1991. Т. 321, № 1. С. 66–68.
10. **Петров Ю. В.** Критерий инкубационного времени и импульсная прочность сплошных сред: разрушение, кавитация, электрический пробой // *Докл. АН.* 2004. Т. 395, № 5. С. 621–625.
11. **Rodriguez T., Navarro C., Sanchez-Galvez V.** Splitting tests: an alternative to determine the dynamic tensile strength of ceramic materials // *J. Physique. IV.* 1994. V. 4, N C8. P. 101–106.
12. **Bragov A. M., Kruszka L., Lomunov A. K.** Static and dynamic properties of dry and wet cement mortar // *Proc. of the 7th Intern. symp. on brittle matrix composites “BMC-7”, Warsaw (Poland), 13–15 Oct. 2003.* S. 1.: Woodhead Publ., 2003. P. 67–74.
13. **Брагов А. М., Карихалоо Б., Константинов А. Ю. и др.** Исследование механических свойств фибробетона с помощью методики Кольского и ее модификаций // *Вестн. Нижегород. гос. ун-та.* 2011. № 4. С. 123–129.
14. **Petrov Y. V., Smirnov V. I., Krivosheev S. I., et al.** Pulse loading of rocks // *Proc. of the Intern. conf. “VII Khariton’s topical scientific readings”, Sarov (Russia), 14–18 Mar. 2005.* Sarov: VNIIEF, 2005. P. 189–190.

Поступила в редакцию 20/II 2012 г.
