

УДК 691.32

## ДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ХРУПКИХ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД<sup>\*)</sup>

© 2012 г. А.М. Брагов<sup>1</sup>, А.Ю. Константинов<sup>1</sup>, Д.А. Ламзин<sup>2</sup>,  
А.К. Ломунов<sup>1</sup>, А.Р. Филиппов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

<sup>2</sup>Нижегородский государственный  
архитектурно-строительный университет

bragov@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 29.06.2012

Представлены результаты экспериментальных исследований основных механических свойств хрупких структурно-неоднородных сред типа бетонов, фибробетонов, керамик и огнеупоров различной плотности, а также некоторых горных пород. Экспериментальное изучение динамических свойств было выполнено с использованием метода Кольского, его модификаций. Показано, что на механические свойства существенное влияние оказывают вид напряженно-деформированного состояния, скорость деформации, скорость роста напряжений.

*Ключевые слова:* хрупкие материалы, метод Кольского, прочность, растяжение, сжатие, экспериментальное исследование, скорость деформации.

### Объект исследования

Хрупкие структурно-неоднородные материалы по своему происхождению можно разделить на природные (например, твердые горные породы) и искусственные (такие как бетоны, фибробетоны и пористые огнеупоры). Интерес к изучению поведения подобных материалов в условиях интенсивных кратковременных воздействий в последние годы значительно усилился в связи с необходимостью решения ряда проблем: анализа распространения сильных сейсмических и взрывных волн и их взаимодействия с наземными и подземными сооружениями; использования энергии взрыва при строительстве туннелей, плотин, каналов, при разработке полезных ископаемых и т.п.

Высокопористые материалы, такие как шамот и муллит, обладают высокой температурой плавления. Благодаря своим свойствам эти материалы могут быть с успехом использованы в слоистой защите в качестве легковесного демпфирующего элемента, эффективно поглощающего ударную волну, в конструкции контейнеров

---

<sup>\*)</sup>Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 12-05-01075, 12-01-00805, 12-08-31337-мол\_а, 12-01-31082-мол\_а), Министерством образования и науки РФ (соглашения 14.В37.21.1902, 14.В37.21.1137, 14.В37.21.1495) и Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-2843.2012.8).

для авиа-, автомобильных и других перевозок радиоактивных или высокотоксичных материалов. В случае возникновения аварийных ситуаций, терактов, сопровождающихся ударными или взрывными воздействиями и высокими температурами, эти материалы могут значительно уменьшить последствия подобных ситуаций.

Фибробетон, как и традиционный бетон, представляет собой композиционный материал, включающий дополнительно равномерно распределенную в своем объеме фибровую арматуру. Известно, что дисперсное фибровое армирование позволяет в большой степени компенсировать недостатки обычного бетона – низкую прочность при растяжении и хрупкость разрушения. Фибробетон имеет в несколько раз более высокую прочность при растяжении и срезе, ударную и усталостную прочность, высокую удельную энергию разрушения, в том числе при действии ударов и при других динамических и сейсмических нагрузках. В этой связи представляется перспективным его использование в ответственных конструкциях и сооружениях атомной, энергетической, военной техники, которые в процессе эксплуатации из-за техногенных катастроф, террористических актов могут испытывать интенсивные воздействия ударного или взрывного характера. Для проектирования изделий с использованием описанных материалов необходимо знание их динамических свойств.

### Методы исследований

Экспериментальное изучение динамического поведения материалов (определение ударной сжимаемости, прочностных и деформационных характеристик) было выполнено с использованием традиционного метода Кольского и ряда оригинальных модификаций в условиях одноосного напряженного состояния и одноосной деформации [1–3]. Для получения больших степеней деформаций малоплотных сред применялось многоцикловое нагружение образцов в одном эксперименте [4]. Суть метода состоит в том, что вследствие большой разницы акустических импедансов  $\rho c$  образца и мерных стержней доля прошедшей в опорный стержень волны (по отношению к падающему импульсу) оказывается очень мала, а амплитуда отраженного импульса сравнима с амплитудой падающего, вследствие чего образец подвергается многократному нагружению в одном испытании нагрузками, достаточными для его деформирования до больших степеней деформации. В качестве примера на рис. 1 приводятся импульсы деформации мерных стержней пяти циклов нагружения, полученные при испытании высокопористого шамота.

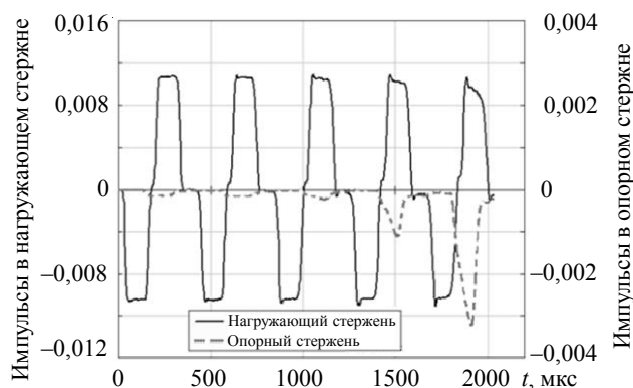


Рис. 1. Импульсы деформаций мерных стержней

Для того чтобы зарегистрировать несколько прошедших импульсов, длина опорного стержня должна быть достаточной для акустической развязки полезного сигнала и импульсов, вернувшихся с его заднего торца. Так, если мерные стержни выполнены из одного и того же материала, для регистрации трех циклов нагружения длина опорного стержня должна быть в три раза больше длины нагружающего стержня.

Другим способом получения сигналов для нескольких циклов нагрузки является использование комбинированной установки, мерные стержни которой изготовлены из разных материалов (с разной скоростью звука). Так, использование нагружающего стержня из алюминиевого сплава Д16 ( $c = 5150$  м/с) и опорного из винипласта ( $c = 1500$  м/с) позволило зарегистрировать пять циклов нагрузки. Для исключения влияния дисперсии волны при регистрации импульсов деформации тензодатчики на поверхности вязкоупругого опорного стержня размещаются в непосредственной близости от торца, примыкающего к образцу.

Для определения предела прочности хрупких материалов при растяжении применялась модификация методики Кольского – «Бразильский тест» (испытание на раскалывание) [5]. При обычных испытаниях на сжатие цилиндрических образцов нагрузка прикладывается по продольной оси образца. В экспериментах на раскалывание образец в виде цилиндра поворачивается на  $90^\circ$  относительно поперечной оси, и нагрузка прикладывается по диаметральной плоскости образца, то есть по образующей цилиндра. В этом случае в направлении, перпендикулярном направлению действия нагрузки, возникают растягивающие напряжения.

### Испытуемые материалы и образцы

Испытаниям подвергались образцы мелкозернистого бетона, строительных растворов с песчаным заполнителем разного размера, фибробетона, диоксидциркониевой керамики и огнеупоров различной плотности, ряда горных пород. Некоторые механические характеристики керамики и огнеупоров приведены в таблице 1. Образцы для испытаний были изготовлены в виде таблеток диаметром 20 мм и толщиной 10 мм (для испытаний на установке РСГ-20 с мерными стержнями диаметром 20 мм), а также диаметром 60 мм и толщиной 35 мм (для испытаний на установке РСГ-60 с мерными стержнями диаметром 60 мм).

Таблица 1

#### Механические свойства керамики и пористых огнеупоров на основе глиноземов

Материал	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	$E$ , ГПа	$G$ , ГПа	$\nu$
Промышленная керамика $ZrO_2+CaO$ ТУ 14-8-98-89	4,82	20	49,3	21,3	0,16
Муллит ВГ-62 ТУ 14-8-570-88	2,26	16,5	16,5	6,5	0,27
Шамот ШЛ-0.4 ГОСТ 5040-96	0,4	80	0,37	0,14	0,29

Состав испытанного мелкозернистого бетона (партия 1) и строительного раствора (партии 2, 3) с песком различных фракций приведен в таблице 2. В качестве вяжущего использовался портландцемент марки М400. Во всех партиях заполнитель, цемент и вода смешивались в соотношении  $\approx 3:1:0,6$ . Диаметр образцов был  $\approx 55$  мм, толщина  $\approx 20$  мм.

Таблица 2

## Состав образцов мелкозернистого бетона и строительного раствора

Номер партии	Размер фракции, мм		Вода : цемент : песок : щебень	Плотность материала, г/см <sup>3</sup>
	Песок	Щебень		
1	< 1,0	2,5–7	0,56:1:1,1:3	–
2	0,4	–	0,6:1:3:0	–
3	0,2	–	0,5:1:3:0	1,88–1,98

В качестве природных хрупких материалов были испытаны горные породы: габбро-диабаз и два сорта мрамора. Габбро-диабаз относится к глубинным магматическим горным породам, имеет массивную текстуру, мелко-среднезернистую структуру, без каверн и неоднородностей, равномерно окрашенную в темно-серый цвет. Средняя плотность – 3,09 г/см<sup>3</sup>. Статический предел прочности при сжатии 310 МПа. Мраморы состоят из кристаллов кальцита, иногда с примесью зерен доломита. Кристаллы часто видны невооруженным глазом и прочно соединены один с другим. Мраморы образовались из известняков и доломитов под влиянием высокой температуры или под воздействием огромных давлений, вызвавших перекристаллизацию известняков. Минералогический состав: кальцит – 98%, прочие – 2%. Средняя плотность 2,72 г/см<sup>3</sup>. Статический предел прочности при сжатии 62 МПа.

## Результаты исследований

Было выполнено многоцикловое нагружение образцов легковесного шамота при сжатии в условиях одноосной деформации и получены диаграммы деформирования до степеней деформации 80%. После выбирания пористости (~40%) отмечается значительный рост напряжений. Поскольку достичь большей степени сжатия и больших амплитуд нагрузок при использовании винипластового стержня не удастся, испытанные образцы подвергались повторному нагружению, но уже с использованием опорного стержня из сплава Д16Т. Полученная диаграмма представлена на рис. 2а. Диаграммы повторных нагружений неуклонно нарастают, а степень сжатия приближается к единице. Материал в результате испытания полностью разрушается, представляя собой не связанные между собой очень мелкие частицы.

На рис. 2б показано сравнение диаграмм деформирования шамота ШЛ-04, полученных с использованием методики разрезного стержня (НИИМ ННГУ) и копро-вой установки (ВНИИЭФ).

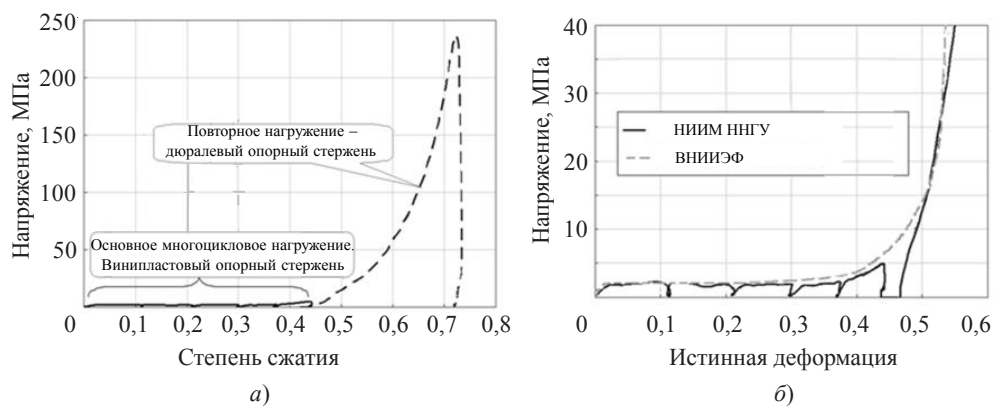


Рис. 2. Результаты испытаний шамота

Видно хорошее совпадение как в уровне структурной прочности, так и в величине деформации, при которой начинается процесс интенсивного роста напряжений.

Результаты исследования свойств керамики  $ZrO_2+CaO$  при разных видах напряженно-деформированного состояния (НДС) показаны на рис. 3. На рис. 3а представлены временные зависимости основных характеристик керамики. На рис. 3б показаны зависимости коэффициента бокового распора и касательного напряжения от давления. Следует отметить, что значение коэффициента бокового распора на начальном участке достигает величины 0,7. Далее коэффициент бокового распора уменьшается до постоянной величины 0,27. Такое поведение коэффициента бокового распора может быть связано с тем, что на начальном участке амплитуды импульсов в стержне и обойме малы и при делении одной малой величины на другую малую величину могут возникнуть значительные погрешности. Рисунок 3в демонстрирует расположение основных кривых деформирования: диаграмму одноосной деформации, гидростату, диаграмму одноосного напряженного состояния и диаграмму в интенсивностях  $\sigma(\epsilon)$ . Все диаграммы как на ветви нагрузки, так и на ветви разгрузки нелинейны.

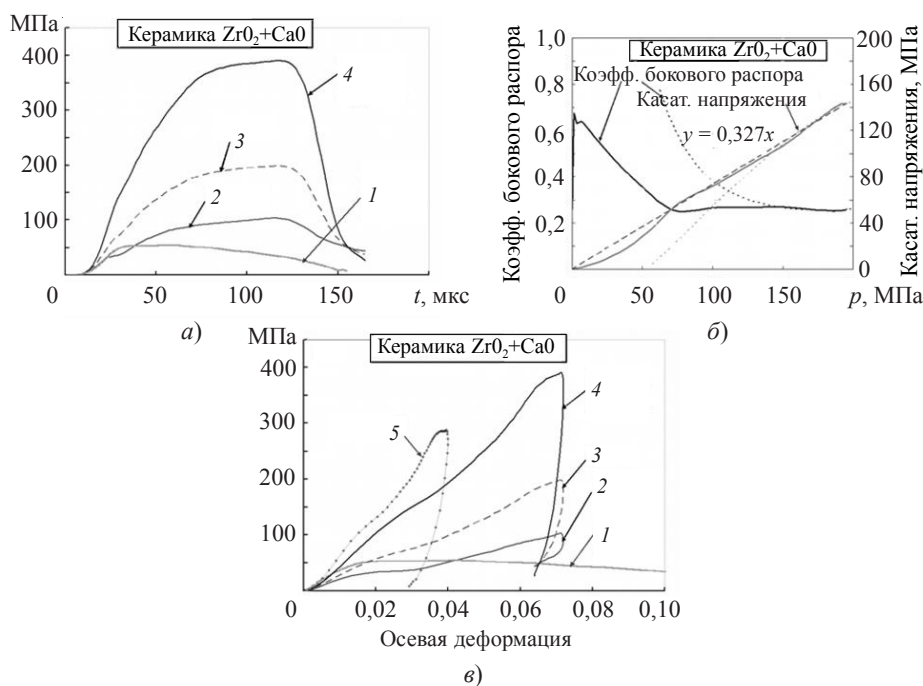


Рис. 3. Динамические свойства керамики  $ZrO_2+CaO$ : 1 – осевое напряжение при одноосном напряженном состоянии; 2 – радиальное напряжение; 3 – давление; 4 – осевое напряжение при одноосной деформации; 5 – инвариантная диаграмма

Муллит – минерал из класса силикатов, единственное соединение  $Al_2O_3$  с  $SiO_2$ , устойчивое при высоких температурах, входит в состав глиноземистого огнеупора – шамота. На рис. 4 показаны динамические диаграммы деформирования муллита, полученные при скоростях деформаций от 100 до 2000  $s^{-1}$  (сплошные линии – зависимость напряжения от деформации, пунктирные линии – зависимость скорости деформации от деформации). Нижняя диаграмма соответствует незначительным

повреждениям образца, средняя – разрушению образца на мелкие фрагменты, верхняя кривая показывает эффект перегрузки, когда материал образца разрушен полностью. В этом случае за счет высокой скорости нарастания напряжений уже начинающий разрушаться материал подвергается дополнительной нагрузке.

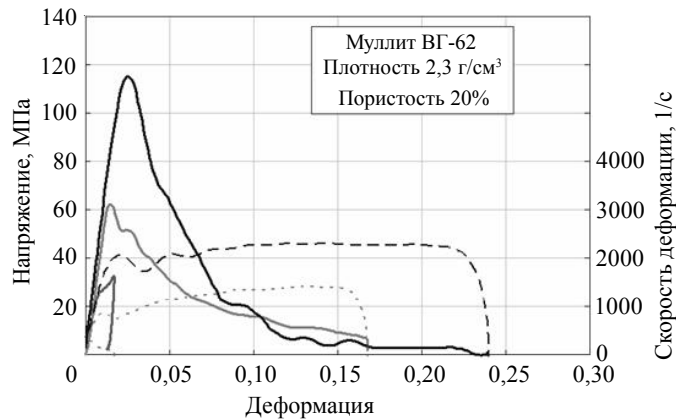


Рис. 4. Влияние скорости деформации на диаграмму деформирования муллита ВГ-62

Поскольку пористые структуры используются в качестве демпферов ударных или взрывных нагрузок, то для оценки их энергопоглощающей способности представляет значительный интерес изучение такой характеристики, как энергоемкость, которая определяется как площадь под диаграммой деформирования. Энергоемкость керамики и пористых огнеупоров при двух видах НДС представлена на рис. 5: слева в условиях одноосного напряженного состояния и справа в условиях одноосной деформации. Видно, что при одноосной деформации энергоемкость материалов существенно больше.

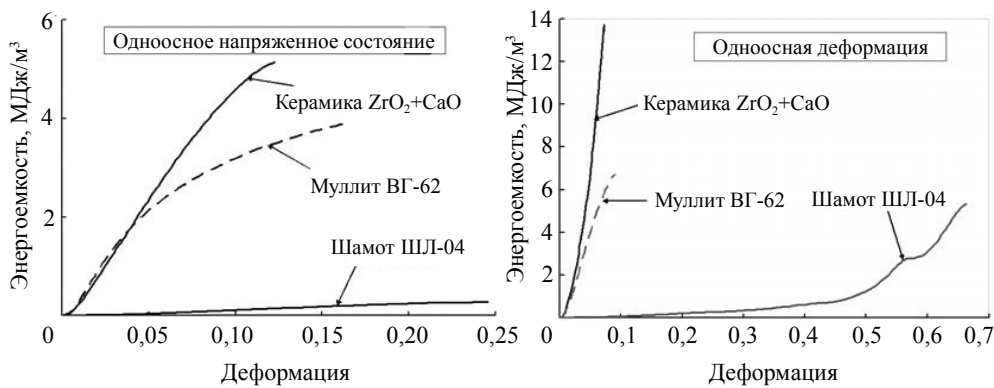


Рис. 5. Энергоемкость керамики, шамота и муллита при разных типах НДС

За счет более высокой структурной прочности пористая керамика на основе диоксида циркония обладает наибольшей энергоемкостью при обоих типах НДС, наименьшей – шамот. Однако малая плотность пористого шамота ШЛ-04 является его преимуществом в случаях, когда важен вес создаваемой слоистой защитной конструкции.

Были выполнены статические и динамические испытания трех горных пород при сжатии и растяжении (раскалывании). Сравнительный анализ прочности ис-

пытанных горных пород при сжатии и раскалывании в зависимости от скорости деформации показан на рис. 6. Наблюдается известная тенденция: слабое изменение прочности горных пород как при сжатии, так и при раскалывании до скоростей деформации  $\sim 10^2 \text{ с}^{-1}$ .

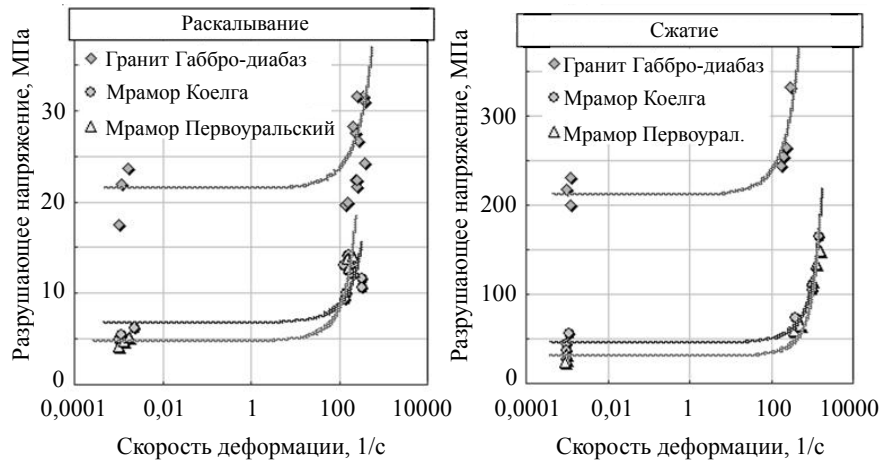


Рис. 6. Влияние скорости деформации на прочность горных пород при сжатии и раскалывании

На рис. 7 приведены значения прочности на сжатие фибробетона [6], мелкозернистого бетона (партия 1) и строительных растворов (партии 2, 3) при разных скоростях деформации.

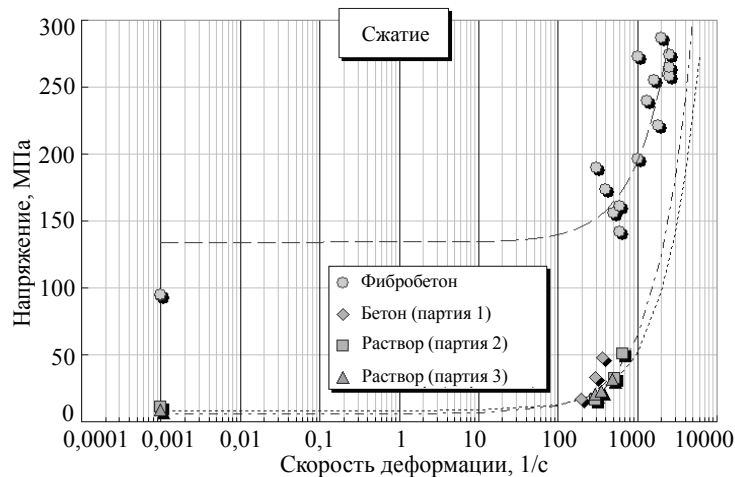


Рис. 7. Сравнение результатов динамических испытаний фибробетона, мелкозернистого бетона (партия 1) и строительных растворов (партии 2, 3)

Оценивая экстраполяцией значения прочности строительного бетона и раствора при скоростях деформации, больших  $\sim 1000 \text{ с}^{-1}$  (продолжая аппроксимирующие прямые за пределы этой величины скорости деформации), видим, что фибробетон обладает примерно такой же чувствительностью к скорости деформации, как и раствор с размером частиц песка 0,2 и 0,4 мм (т.е. поведение фибробетона при высокоскоростном деформировании аналогично поведению обычного строительного

раствора этих двух партий). Однако исследуемый фибробетон обладает более высокой прочностью по сравнению с раствором. Следует отметить, что прочность образцов всех партий существенно зависит от скорости деформации, что согласуется с выводами других исследователей [7–11].

### Выводы

1. Исследованы свойства при сжатии ряда хрупких материалов: горных пород, пористых огнеупоров и керамики, мелкозернистого бетона и фибробетона, строительного раствора, получены динамические диаграммы этих материалов.

2. Сравнение энергоемкости пористых демпфирующих материалов в условиях одноосного напряженного состояния и одноосной деформации показывает, что за счет более высокой структурной прочности пористая керамика на основе диоксида циркония обладает наибольшей энергоемкостью при обоих типах напряженно-деформированного состояния.

3. Исследования статических и динамических свойств гранита Габбро-диабазы, мрамора Коелга и мрамора Первоуральского при сжатии и растяжении показали, что прочность этих пород при растяжении в 8–10 раз меньше, чем при сжатии, что согласуется с общепринятыми представлениями о свойствах хрупких материалов. Влияние скорости деформации на прочностные свойства горных пород начинается при скоростях деформации более  $10^2 \text{ с}^{-1}$ .

4. Испытания фибробетона показали значительное увеличение его прочности (до 10 раз при квазистатическом нагружении) по сравнению с соответствующими характеристиками мелкозернистого бетона и строительного раствора. В то же время фибробетон обладает примерно такой же чувствительностью к скорости деформации, что и обычный раствор с размером частиц песка 0,2 и 0,4 мм.

5. Для всех испытанных материалов отмечен значительный рост разрушающих напряжений с ростом скорости деформации.

### Список литературы

1. *Kolsky H.* An investigation of the mechanical properties of material at very high rates of loading // Proc. Phys. Soc. London. 1949. V. 62B. P. 676–700.
2. *Брагов А.М., Ломунов А.К.* Использование метода Кольского для динамических испытаний конструкционных материалов // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Анализ и оптимизация конструкций: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 1995. С. 127–136.
3. Методические особенности изучения динамической сжимаемости мягких грунтов в диапазоне давлений 0,05–1,5 ГПа / А.М. Брагов, В.П. Гандурин, Г.М. Грушевский, А.К. Ломунов // Химическая физика. 1995. Т. 14, №2-3. С. 126–135.
4. *Брагов А.М., Ломунов А.К., Сергеичев И.В.* Модификация метода Кольского для исследования свойств малоплотных материалов при высокоскоростном циклическом деформировании // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42, №6. С. 199–204.
5. *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. P. 101–106.
6. Исследование механических свойств фибробетона с помощью методики Кольского и ее модификаций / А.М. Брагов, Б. Карихалоо, А.Ю. Константинов и др. // Вестник ННГУ. 2011. №4. С. 123–129.
7. *Баженов Ю.М.* Бетон при динамическом нагружении. М.: Стройиздат, 1970. 274 с.
8. *Bischoff P.H., Perry S.H.* Compressive behaviour of concrete at high strain rates // Materials and Structures. 1991. V 24. P. 425–450.
9. *Grote D.L., Park S.W., Zhou M.* Dynamic behavior of concrete at high strain-rates and



pressures: I. Experimental characterization // *Int. J. Impact Engng.* 2011. V. 25. P. 869–886.

10. *Malvern L.E., Ross C.A.* Dynamic response of concrete and concrete structures. Second Annual Technical Report. AFOSR contract no. F49620-83-K007. 1985.

11. *Tedesco J.W., Ross C.A.* Strain-rate-dependent constitutive equations for concrete // *ASME J. Press. Vessel Technol.* 1998. V. 120. P. 398–405.

### **DYNAMIC DEFORMATION AND FRACTURE OF HETEROGENEOUS BRITTLE MEDIA**

**A.M. Bragov, A.Yu. Konstantinov, D.A. Lamzin, A.K. Lomunov, A.R. Filippov**

The work present the results of experimentally investigating the basic mechanical properties of heterogeneous brittle media such as concrete, fiber-reinforced concrete, ceramics and refractory materials of different density, as well as some rocks. The dynamic properties were experimentally studied using Kolsky method and its modifications. It is shown that the mechanical properties are strongly influenced by the stress-strain state, strain rate and the stress increase rate.

*Keywords:* brittle materials, Kolsky method, strength, tension, compression, experimental investigation, strain rate.