

УДК 539.3

ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ОБЪЕМНО-СЖИМАЕМОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА*

© 2018 г.

Марков И.П., Константинов А.Ю.

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

markov@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 20.08.2018

Композиционные материалы применяются в оборонной, аэрокосмической, автомобильной, энергетической и прочих областях науки и техники, в которых предъявляются повышенные требования к прочности, износостойкости, удельному весу, устойчивости к интенсивным динамическим воздействиям в экстремальных эксплуатационных условиях. Требуемые высокая удельная прочность, жесткость и необходимые свойства в заданном направлении делают применение композиционных материалов более предпочтительным по сравнению с традиционными материалами. Для получения данных о физико-механических свойствах материалов в широком диапазоне условий нагружения необходимо проведение экспериментальных исследований, в том числе в динамическом диапазоне скоростей деформаций. Для исследования динамического поведения композиционного огнезащитного материала использовался автоматизированный испытательный стенд, реализующий методику Кольского для разрезного стержня Гопкинсона. Приведены основные зависимости традиционной схемы метода Кольского. Для определения динамических кривых объемной сжимаемости исследуемого материала использована модификация системы разрезного стержня с применением ограничивающей жесткой обоймы, в которой, в отличие от традиционной схемы, образец размещается в упругой обойме, препятствующей радиальной деформации образца. При этих условиях деформированное состояние образца рассматривается как одномерное, а напряженное состояние – как объемное осесимметричное. Приведены соотношения для определения радиальных напряжений, объемной деформации и давления в образце. Испытания проводились при двух различных температурах. Сравнением полученных зависимостей давления от истинной (логарифмической) объемной деформации установлено слабое влияние температуры. По полученным экспериментальным данным определены объемный модуль упругости, модуль сдвига и коэффициент Пуассона. Сравнение результатов динамического и статического деформирования образцов показало, что динамические эффекты при исследовании деформирования рассматриваемого материала можно не учитывать.

Ключевые слова: метод Кольского, разрезной стержень Гопкинсона, динамическое деформирование, композиционные материалы, эксперимент.

* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант №16-38-60097 мол_а_дк).

Введение

Композиционные материалы представляют собой природные или искусственные материалы, изготовленные из двух или более компонентов с различными свойствами. Различные свойства составляющих, их микроструктура и межкомпонентное взаимодействие помогают добиться требуемых свойств у изделий, изготовленных из композиционных материалов. Композиционные материалы применяются в оборонной, аэрокосмической, автомобильной, энергетической и прочих областях науки и техники, в которых предъявляются повышенные требования к прочности, износостойкости, удельному весу, устойчивости при интенсивных динамических воздействиях в экстремальных эксплуатационных условиях (низкие или высокие температуры, воздействие коррозионной среды и т.д.). Высокая удельная прочность, жесткость и необходимые свойства в заданном направлении делают применение композиционных материалов более предпочтительным по сравнению с традиционными материалами. В процессе эксплуатации структурные элементы, выполненные из композиционных материалов, могут испытывать динамические нагрузки (взрывные, ударные и динамические усталостные). При таких нагрузках отклик конструкции зависит от скорости нагружения.

На ранних этапах проектирования новых изделий для анализа вариантов компоновки и оптимизации разрабатываемой конструкции в настоящее время широко используется численное моделирование. Такой подход позволяет сократить сроки проектирования и снизить затраты на экспериментальные исследования. Точность результатов численного моделирования поведения конструкций при динамическом нагружении зависит от точности входных данных, таких как материальные функции и определяющие соотношения математических моделей, описывающих поведение материалов.

В настоящей статье для экспериментального исследования динамического поведения объемно-сжимаемого композиционного материала при динамическом нагружении использована модифицированная методика Кольского для разрезного стержня Гопкинсона. Экспериментальные кривые получены при различных температурах. По полученным экспериментальным данным определены объемный модуль, модуль сдвига и коэффициент Пуассона, кривые объемной сжимаемости, а также прочность композита при одномерном сжатии.

1. Методы исследований

Для исследования динамического поведения композиционных материалов использовался автоматизированный испытательный стенд, реализующий методику Кольского для разрезного стержня Гопкинсона (РСГ). Традиционный вариант метода Кольского с использованием РСГ [1–6] позволяет испытывать различные материалы на сжатие в диапазоне скоростей деформаций 10^2 – 10^4 с⁻¹. Существует множество различных модификаций системы разрезного стержня, которые применяются для изучения высокоскоростного деформирования материалов при растяжении, кручении, сдвиге, раскалывании и т.д. [7–17].

Традиционная схема метода Кольского для РСГ для испытания на сжатие состоит из нагружающего и опорного мерных стержней, которые обладают высоким пределом текучести, и расположенного между ними короткого образца из исследуемого материала (рис. 1). В нагружающем стержне возбуждается продольная волна

сжатия $\varepsilon_r(t)$, которая в мерных стержнях распространяется со скоростью звука c . При достижении поверхности контакта нагружающего стержня с образцом эта волна частично отражается обратно, а частично проходит через образец и передается волной сжатия $\varepsilon_r(t)$ на опорный мерный стержень. Отраженная волна $\varepsilon_r(t)$ является волной растяжения.

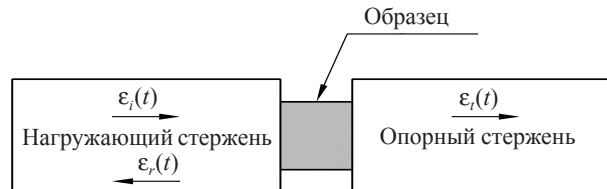


Рис. 1. Образец в системе разрезного стержня в традиционном варианте метода Кольского

По зарегистрированным в мерных стержнях импульсам деформации $\varepsilon_i(t)$, $\varepsilon_r(t)$, и $\varepsilon_t(t)$ можно определить деформации, скорость деформации и напряжения в образце, используя формулы Кольского:

$$\varepsilon_s(t) = -\frac{2c}{l_s} \int_0^t \varepsilon_r(t) dt, \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = -\frac{2c}{l_0} \varepsilon_r(t), \quad (2)$$

$$\sigma_s(t) = E \frac{A}{A_s} \varepsilon_t(t), \quad (3)$$

где l_s – исходная длина образца, A_s – исходная площадь поперечного сечения образца, E и A – модуль упругости и площадь поперечного сечения мерных стержней. Подразумевается, что мерные стержни изготовлены из одного материала и имеют один и тот же диаметр. Для определения истинной (логарифмической) деформации используется соотношение

$$\varepsilon_s^u(t) = \ln(1 - \varepsilon_s(t)). \quad (4)$$

Для проведения высокоскоростных испытаний объемно-сжимаемого композиционного материала была использована модификация метода РСГ [18–20] с применением ограничивающей жесткой обоймы (рис. 2).

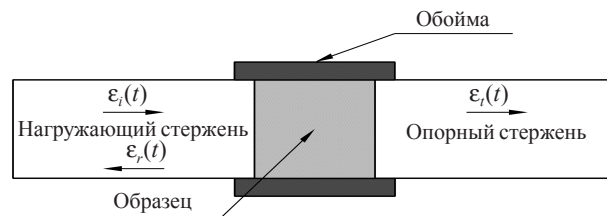


Рис. 2. Нагружение образца в схеме РСГ с упругой обоймой

Основное отличие схемы с обоймой от традиционной схемы метода Кольского для РСГ заключается в том, что исследуемый образец помещается в упругую обойму, которая препятствует радиальной деформации образца. При этих условиях радиальной деформацией образца по сравнению с осевой деформацией можно прене-

брежь, деформированное состояние образца можно считать одномерным, а напряженное состояние – объемным осесимметричным (рис. 3).

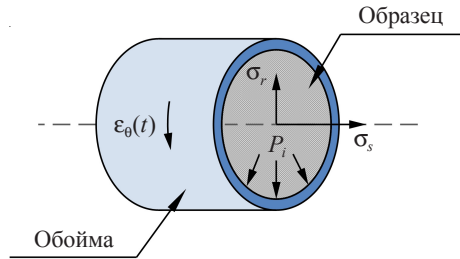


Рис. 3. Образец, размещенный в упругой обойме

После определения по методу Кольского осевых деформации образца и напряжения в нем по формулам (1)–(3) главные компоненты тензоров деформаций и напряжений записываются следующим образом:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_s, \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0, \quad \sigma_1 = \sigma_s, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r, \quad (5)$$

где σ_r – радиальные напряжения в образце.

По отношению к обойме радиальные напряжения σ_r являются внутренним давлением P_i . Связь внутреннего давления и зарегистрированного на внешней поверхности обоймы импульса окружной деформации $\varepsilon_0(t)$ определяется решением задачи Ламе о деформировании отрезка толстостенной трубы под действием внутреннего давления:

$$P_i(t) = \sigma_r(t) = \frac{1}{2a^2} [E_j(b^2 - a^2)\varepsilon_0(t)], \quad (6)$$

где a и b – внутренний и внешний радиусы обоймы, E_j – модуль Юнга обоймы.

Объемная деформация и давление в объемно-сжимаемом образце определяются соотношениями:

$$\theta = \varepsilon_s, \quad (7)$$

$$P = \frac{1}{3}(\sigma_s + 2\sigma_r). \quad (8)$$

В использованной конфигурации экспериментальной установки мерные стержни и обойма изготовлены из алюминиевого сплава Д16Т (модуль Юнга 70 ГПа, коэффициент Пуассона 0,33, плотность 2650 кг/м³). Мерные стержни имели диаметр 20 мм. Нагружающий стержень имел длину 1,5 м, опорный стержень – 3 м. Для создания импульса деформации в нагружающем стержне применялся ударник длиной 250 мм, разгоняемый в стволе газовой пушки калибром 20 мм. Толщина стенки ограничивающей обоймы составляла 1 мм. В экспериментах использовались образцы длиной 8 мм и диаметром 20 мм.

2. Результаты исследований

В экспериментах с применением ограничивающей обоймы исследовались образцы объемно-сжимаемого огнезащитного композиционного материала ФК-75. Испытания проводились при температурах –40 °С и 23 °С. Измеренная плотность материала составила 120 кг/м³. Зависимости давления от истинной (логарифми-

ческой) объемной деформации приведены на рис. 4 (начальный участок) и рис. 5 (кривые полностью). Кривые получены при четырехцикловом нагружении в ходе каждого испытания [14]. До деформации $\sim 0,035$ можно выделить начальный линейный участок (рис. 6).

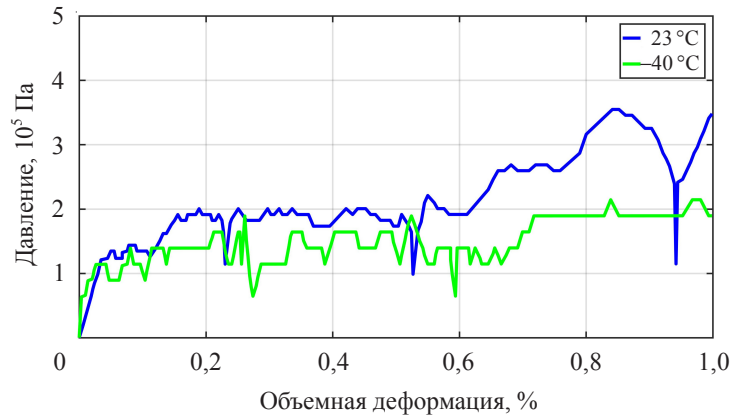


Рис. 4. Начальные участки кривых объемной сжимаемости при различных температурах

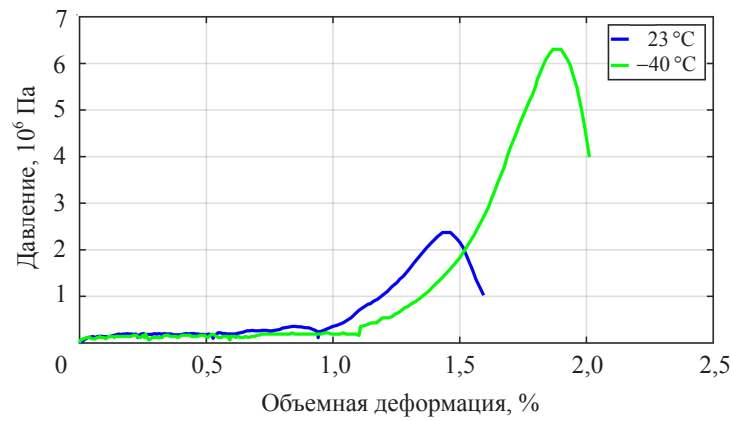


Рис. 5. Кривые объемной сжимаемости при различных температурах

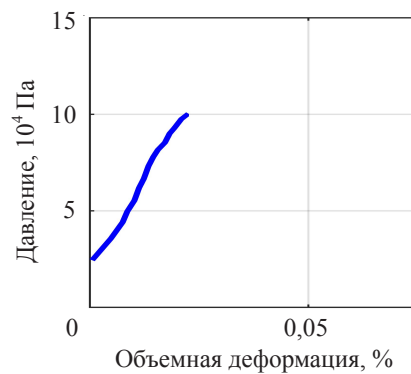


Рис. 6. Линейный участок кривой объемной сжимаемости

Сравнение полученных зависимостей давления от истинной (логарифмической) объемной деформации, приведенных на рис. 4 и рис. 5, демонстрирует слабое влияние температуры.

Объемный модуль упругости K соответствует тангенсу угла наклона линейного участка (см. рис. 6) и в данном случае составляет 3,77 МПа. Определенное по величине бокового распора в экспериментах с обоймой значение коэффициента Пуассона составило $\nu = 0,135$. Модуль сдвига определим по формуле:

$$G = 3K \frac{1 - 2\nu}{2(1 + \nu)} = 3,64 \text{ МПа.} \quad (9)$$

На кривых, изображенных на рис. 4, 5, виден пологий участок (до деформации $\sim 1,1$), после которого начинается резкое упрочнение материала, что связано со схлопыванием пор. Диаграммы деформирования, полученные при испытаниях на одноосное сжатие, приведены на рис. 7. В этом случае до деформаций $\sim 1,1$ также не происходит видимого упрочнения.

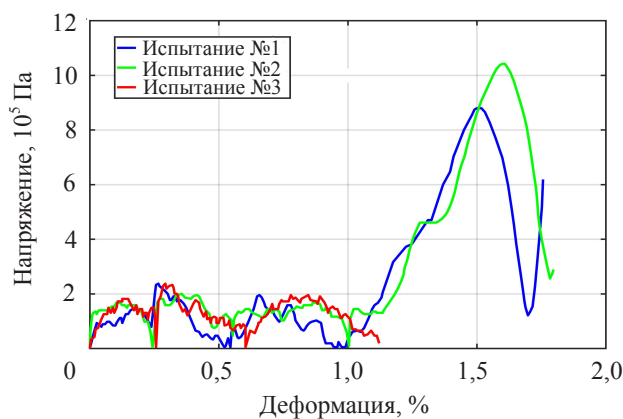


Рис. 7. Диаграммы деформирования при испытании на одноосное сжатие

Результаты динамического и статического деформирования образцов, приведенные на рис. 8 и 9, показывают, что динамические эффекты при исследовании деформирования ФК-75 можно не учитывать.

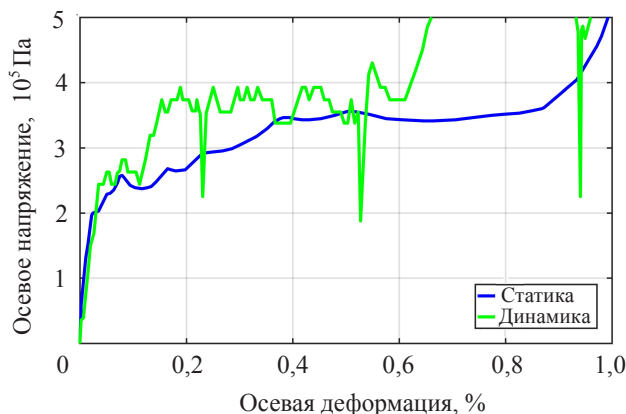


Рис. 8. Начальные участки статической и динамической диаграмм деформирования

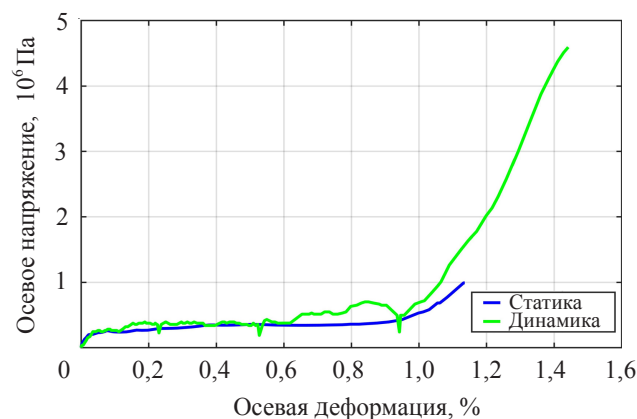


Рис. 9. Статическая и динамическая диаграммы деформирования

Заключение

На испытательном стенде, реализующем модифицированный метод Кольского для разрезного стержня Гопкинсона, проведены испытания на ударное сжатие в условиях одноосного и объемного (с применением ограничивающей обоймы) напряженного состояния объемно-сжимаемого огнестойкого композиционного материала. Согласно полученным экспериментальным данным, продемонстрировано слабое влияние как температуры, так и скорости деформации на деформационные и прочностные характеристики исследованного материала. Определены объемный модуль упругости, модуль сдвига и коэффициент Пуассона.

Список литературы

1. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of material at very high rates of loading. *Proceedings of the Physical Society. Section B*. 1949. Vol. 62. No 11. P. 676–700.
2. Lindholm U.S. Some experiments with the split Hopkinson pressure bar. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1964. Vol. 12. P. 317–335.
3. Lindholm U.S., Yeakley L.M. High strain-rate testing: tension and compression. *Experimental Mechanics*. 1968. Vol. 8. No 1. P. 1–9.
4. Griffiths L.J., Martin D.J. A study of the dynamic behaviour of a carbon-fibre composite using the split Hopkinson pressure bar. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1974. Vol. 7. No 17. P. 2329–2341.
5. Nicholas T. Tensile testing of materials at high rates of strain. *Experimental Mechanics*. 1981. Vol. 21. No 5. P. 177–195.
6. Брагов А.М., Ломунов А.К. Использование метода Кольского для динамических испытаний конструкционных материалов. *Прикладные проблемы прочности и пластичности*. 1995. Вып. 51. С. 127–137.
7. Campbell J.D., Dowling A.R. The behaviour of materials subjected to dynamic incremental shear loading. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1970. Vol. 18. No 1. P. 43–63.
8. Dharan C.K.H., Hauser F.E. Determination of stress-strain characteristics at very high strain rates. *Experimental Mechanics*. 1970. Vol. 10. No 9. P. 370–376.
9. Christensen R.J., Swanson S.R., Brown N.S. Split-Hopkinson-bar tests on rock under confining pressure. *Experimental Mechanics*. 1972. Vol. 12. No 11. P. 508–513.
10. Klepaczko J. Application of the split Hopkinson pressure bar to fracture dynamics. *Mechanical Properties at High Rates of Strain*. 1979. P. 201–214.
11. 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.

12. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *International Journal of Impact Engineering*. 1995. Vol. 16. No 2. P. 321–330.
13. Gilat A. Torsional Kolsky bar testing. *ASM Handbook. ASM International*. 2000. Vol. 8. P. 505–515.
14. 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. Вып. 42. №6. С. 199–204.
15. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K. Determining dynamic friction using a modified Kolsky method. *Technical Physics Letters*. 2008. Vol. 34. No 5. P. 439–440.
16. Bragov A.M., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A. Modified Kolsky method for determining the shear strength of brittle materials. *Technical Physics Letters*. 2017. Vol. 43. No 1. P. 130–132.
17. Bragov A., Igunnov L., Lomunov A., Konstantinov A., Lamzin D., Kruszka L. Use of the Kolsky method for dynamic tests of brittle media. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 174. Art. No 02022.
18. Gong J.C., Malvern L.E. Passively confined tests of axial dynamic compressive strength of concrete. *Experimental Mechanics*. 1990. Vol. 30. No 1. P. 55–59.
19. Bragov A.M., Grushevsky G.M., Lomunov A.K. Use of the Kolsky method for studying shear resistance of soils. *DYMAT Journal*. 1994. Vol. 1. No 3. P. 253–259.
20. Bragov A.M., Grushevsky G.M., Lomunov A.K. Use of the Kolsky method for confined tests of soft soils. *Experimental Mechanics*. 1996. Vol. 36. No 3. P. 237–242.

References

1. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of material at very high rates of loading. *Proceedings of the Physical Society. Section B*. 1949. Vol. 62. No 11. P. 676–700.
2. Lindholm U.S. Some experiments with the split Hopkinson pressure bar. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1964. Vol. 12. P. 317–335.
3. Lindholm U.S., Yeakley L.M. High strain-rate testing: tension and compression. *Experimental Mechanics*. 1968. Vol. 8. No 1. P. 1–9.
4. Griffiths L.J., Martin D.J. A study of the dynamic behaviour of a carbon-fibre composite using the split Hopkinson pressure bar. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1974. Vol. 7. No 17. P. 2329–2341.
5. Nicholas T. Tensile testing of materials at high rates of strain. *Experimental Mechanics*. 1981. Vol. 21. No 5. P. 177–195.
6. Bragov A.M., Lomunov A.K. Ispolzovaniye metoda Kolskogo dlya dinamicheskikh ispytaniy konstruktsionnykh materialov [Use of the Kolsky method for dynamic testing of structural materials]. *Prikladnyye problemy prochnosti i plastichnosti [Applied Problems of Strength and Plasticity]*. 1995. Vol. 51. P. 127–137 (In Russian).
7. Campbell J.D., Dowling A.R. The behaviour of materials subjected to dynamic incremental shear loading. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1970. Vol. 18. No 1. P. 43–63.
8. Dharan C.K.H., Hauser F.E. Determination of stress-strain characteristics at very high strain rates. *Experimental Mechanics*. 1970. Vol. 10. No 9. P. 370–376.
9. Christensen R.J., Swanson S.R., Brown N.S. Split-Hopkinson-bar tests on rock under confining pressure. *Experimental Mechanics*. 1972. Vol. 12. No 11. P. 508–513.
10. Klepaczko J. Application of the split Hopkinson pressure bar to fracture dynamics. *Mechanical Properties at High Rates of Strain*. 1979. P. 201–214.
11. 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.
12. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *International Journal of Impact Engineering*. 1995. Vol. 16. No 2. P. 321–330.
13. Gilat A. Torsional Kolsky bar testing. *ASM Handbook. ASM International*. 2000. Vol. 8. P. 505–515.

14. Bragov A.M., Lomunov A.K., Sergeichev I.V. Modification of the Kolsky method for studying properties of low-density materials under high-velocity cyclic strain. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2001. Vol. 42. No 6. P. 1090–1094.
15. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K. Determining dynamic friction using a modified Kolsky method. *Technical Physics Letters*. 2008. Vol. 34. No 5. P. 439–440.
16. Bragov A.M., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A. Modified Kolsky method for determining the shear strength of brittle materials. *Technical Physics Letters*. 2017. Vol. 43. No 1. P. 130–132.
17. Bragov A., Igunnov L., Lomunov A., Konstantinov A., Lamzin D., Kruszka L. Use of the Kolsky method for dynamic tests of brittle media. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 174. Art. No 02022.
18. Gong J.C., Malvern L.E. Passively confined tests of axial dynamic compressive strength of concrete. *Experimental Mechanics*. 1990. Vol. 30. No 1. P. 55–59.
19. Bragov A.M., Grushevsky G.M., Lomunov A.K. Use of the Kolsky method for studying shear resistance of soils. *DYMAT Journal*. 1994. Vol. 1. No 3. P. 253–259.
20. Bragov A.M., Grushevsky G.M., Lomunov A.K. Use of the Kolsky method for confined tests of soft soils. *Experimental Mechanics*. 1996. Vol. 36. No 3. P. 237–242.

DYNAMIC TESTING OF VOLUMETRIC COMPRESSIBLE COMPOSITE MATERIAL

Markov I.P., Konstantinov A.Yu.

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

Composite materials are used in civil engineering, defense industry, aerospace, automobile, energy industries and other fields of science and technology, which have increased requirements for strength, wear resistance, specific weight, and resistance to intense dynamic loadings in extreme operating conditions. The required high specific strength, stiffness and desirable properties along a given material direction make composite materials a preferred choice over traditional materials. To obtain data on the physical and mechanical properties of materials in a wide range of loading conditions, it is necessary to carry out experimental studies, including testing with the dynamic range of strain rates. In this paper, to study the dynamic behavior of the composite fire-retardant material, we used an automated test setup that implements the Kolsky method for the split Hopkinson pressure bar. The basic relationships for the conventional scheme of the Kolsky method are given. To determine the volumetric compressibility curves of the material we employed the modification of the split pressure bar system that uses the rigid confining jacket. In which, unlike the conventional scheme, the specimen is placed inside an elastic jacket that confines the radial strain of the specimen. Under these conditions, the strain state of the specimen is considered one-dimensional, and the stress state is three-dimensional axisymmetric. The relationships to determine the radial stresses, volumetric strain and pressure in the specimen are provided. The tests were carried out at two different temperatures. A weak effect of temperature was observed by comparing the obtained pressure-true (logarithmic) volumetric strain curves. The bulk modulus, shear modulus and Poisson's ratio were determined from the obtained experimental data. A comparison of the results of dynamic and static deformation of the specimens showed that the dynamic effects can be ignored when studying the deformation of the considered material.

Keywords: Kolsky method, split Hopkinson pressure bar, dynamic deformation, composite materials, experiment.