

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2022-85-2-243-252

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДУЛЯ ЮНГА И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ*

© 2023 г.

**Ламзин Д.А., Брагов А.М.,
Константинов А.Ю., Басалин А.В.**

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

lamzin.dmitry@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.02.2023

Развита модификация метода Кольского для испытаний хрупких материалов на растяжение при раскалывании. Схема эксперимента предполагает приложение динамической нагрузки по диаметрально противоположным образующим цилиндрической поверхности испытываемого образца, который находится в двухосном напряженном состоянии и разрушается на две половинки от действия растягивающих напряжений. В основе методики заложены допущения о том, что испытываемый материал ведет себя упруго при равновесном деформировании образца. Такую модификацию предложено применять для определения динамических модуля Юнга и коэффициента Пуассона. Представлен вывод соотношений для вычисления указанных механических характеристик на основе закона Гука с использованием экспериментальных возможностей. Проведена апробация предложенной схемы определения упругих констант при испытаниях образцов шамотного кирпича в системе разрезного стержня Гопкинсона. Регистрация импульсов деформации мерных стержней для оценки действующих на образец усилий и вычисления напряжений, возникающих в его центре, осуществлялась с помощью тензометрии. Деформации центральной части образца определялись с помощью технологии корреляции цифровых изображений. При использовании оптического метода в сочетании с тензометрией полученные графики временного роста напряжений и деформаций имели разный шаг по времени. Для обработки экспериментальных данных на основе выведенных формул массивы полученных значений напряжений и деформаций до момента разрушения образца приводились к единому и постоянному интервалу по времени с использованием линейной интерполяции. Проведенное исследование позволило построить графики динамических модуля Юнга и коэффициента Пуассона в зависимости от времени на начальной стадии нагружения образца и определить средние значения этих упругих механических характеристик.

Ключевые слова: метод Кольского, разрезной стержень Гопкинсона, раскалывание, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, упругость, хрупкий материал.

* Выполнено за счет гранта РНФ №21-79-00151, <https://rscf.ru/project/21-79-00151>.

Введение

Для изучения механических свойств материалов в интервале высоких скоростей деформации $10\text{--}10^4\text{ с}^{-1}$, характерных для взрывных и ударных воздействий, применяют метод Кольского [1, 2], который был предложен в 1949 году и использует разрезной стержень Гопкинсона (РСГ), а также его измененные варианты. Методики, использующие РСГ, применяются для изучения поведения в условиях динамики металлов и сплавов [3, 4], композитов [5], бетонов [6–8] и фибробетонов [9–11], горных пород [12, 13], некоторых видов кирпича [14–16]. Они позволяют изучать свойства материалов не только при сжатии, но и при растяжении [17, 18], срезе [19], а также при многоосных и сложных напряженных состояниях [20–22].

Классический разрезной стержень Гопкинсона состоит из двух длинных стержней круглого сечения: нагружающего и опорного, между которыми зажат исследуемый образец материала. Нагружение образца осуществляется импульсом сжатия, который формируется после столкновения с нагружающим стержнем ударника, разогнанного газовой пушкой. Этот нагружающий (падающий) импульс сжатия распространяется по нагружаемому стержню и после взаимодействия с образцом разделяется на отраженный от него импульс растяжения и прошедший через него импульс сжатия. При идеальных условиях проведения испытания должны отсутствовать дисперсия волн при их распространении в системе РСГ, трение между мерными стержнями и образцом, а также должно соблюдаться равенство усилий, действующих на образец со стороны мерных стержней, вызывающее его равновесное деформирование. В процессе эксперимента производится запись осциллограмм, на которых отображаются импульсы деформации мерных стержней, зарегистрированные в их срединных сечениях с помощью электрической тензометрии, а также скорость ударника перед соударением для контроля условий нагружения. Далее производится выделение из осциллограмм импульсов деформации и их взаимная синхронизация по времени для построения диаграммы деформирования изучаемого материала.

Описанный метод постепенно развивался, пополняя набор своих модификаций для построения диаграмм деформирования материалов при разных типах нагружения экспериментальных образцов. Одна из них предполагает двухосное напряженное состояние образца, который раскалывается от действия растягивающих напряжений. В представленной статье методика получила развитие, что дало возможность определять динамические модуль Юнга и коэффициент Пуассона испытываемого материала.

1. Теоретические положения

Для определения прочности хрупких материалов на растяжение используется модификация метода Кольского, при реализации которой цилиндрический образец устанавливается в системе РСГ так, что его ось перпендикулярна оси мерных стержней. После приложения нагрузки происходит разрушение образца на две половинки вследствие анизотропии прочности хрупких сред, которая в разы снижает сопротивление растяжению по сравнению с сопротивлением сжатию. Эту схему нагружения называют испытанием на раскалывание («бразильский тест»). В статье [23] было отмечено, что динамическое раскалывание может применяться для определения прочности на растяжение хрупкого материала, когда наблюдается его упругое поведение и состояние равновесия образца, образование разлома происходит по диамет-

ральной плоскости. Обработка экспериментальных данных осуществляется на основе решения задачи о распределении напряжений в круглом диске, упруго деформируемом под действием двух равных по величине и противоположных по знаку сил P_1 и P_2 , которые направлены вдоль диаметра (рис. 1).

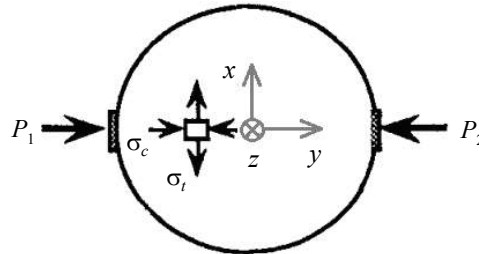


Рис. 1. Схема нагружения образца

В сечении образца плоскостью yOz (в направлении развития трещины) действуют нормальные растягивающие σ_t (постоянные по координате y) и сжимающие σ_c напряжения при отсутствии касательных напряжений, значения которых в центре диска могут быть вычислены по формулам [24]:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi LD}, \quad (1)$$

$$\sigma_c = -\frac{6P}{\pi LD}, \quad (2)$$

где L и D – соответственно толщина и диаметр цилиндрического образца.

Если справедлив закон Гука, а также модуль упругости E и коэффициент Пуассона ν материала имеют одинаковые значения при растяжении и сжатии, деформации растяжения ε_t и сжатия ε_c связаны с действующими напряжениями соотношениями:

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E}(\sigma_t - \nu\sigma_c), \quad (3)$$

$$\varepsilon_c = \frac{1}{E}(\sigma_c - \nu\sigma_t). \quad (4)$$

Для вычисления модуля упругости и коэффициента Пуассона материала образца через компоненты напряжений σ_t , σ_c и деформаций ε_t , ε_c необходимо решить систему уравнений (3) и (4) относительно E и ν . Из уравнения (3) получаем:

$$E = \frac{\sigma_t - \nu\sigma_c}{\varepsilon_t}. \quad (5)$$

Из уравнения (4) следует:

$$E = \frac{\sigma_c - \nu\sigma_t}{\varepsilon_c}. \quad (6)$$

Выражение для коэффициента Пуассона запишется в виде:

$$\nu = \frac{\sigma_c\varepsilon_t - \sigma_t\varepsilon_c}{\sigma_t\varepsilon_t - \sigma_c\varepsilon_c}. \quad (7)$$

Обычно значения основных механических свойств хрупких материалов (модуля упругости, модуля сдвига, коэффициента поперечной деформации и др.), за исклю-

чением предела прочности, принимаются одинаковыми при сжатии и растяжении (см., например, [25]). Таким образом, зная напряжения и деформации в центре образца, можно определить модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала. Напряжения вычисляются через действующие на образец усилия (формулы (1), (2)), которые могут быть определены на основе импульсов деформации мерных стержней, регистрируемых тензодатчиками. Усилие P_1 , действующее на образец со стороны нагружающего стержня:

$$P_1(t) = EA(\varepsilon^I(t) + \varepsilon^R(t)). \quad (8)$$

Усилие P_2 , действующее на образец со стороны опорного стержня:

$$P_2(t) = EA(\varepsilon^T(t)). \quad (9)$$

В формулах (8) и (9) A – площадь поперечного сечения мерных стержней; $\varepsilon^I(t)$, $\varepsilon^R(t)$ и $\varepsilon^T(t)$ – нагружающий, отраженный и прошедший импульсы деформации мерных стержней, зависящие от времени t .

Деформации образца можно непосредственно измерить, например, с помощью технологии корреляции цифровых изображений.

2. Экспериментальные результаты

Предложенная схема определения динамических модуля Юнга и коэффициента Пуассона была апробирована при испытаниях образцов шамотного кирпича на установке с диаметром мерных стержней 20 мм. В связи со «слабым» откликом материала на динамическую нагрузку при проведении экспериментов использовались стержни из алюминиевого сплава, а опорный стержень имел кольцевое сечение. Предпринятые меры позволили увеличить амплитуду регистрируемого прошедшего сигнала. На рис. 2 показаны графики усилий от времени, действующие на образец в процессе его нагружения, которые доказывают выполнение одной из предпосылок используемого метода о равновесии образца.

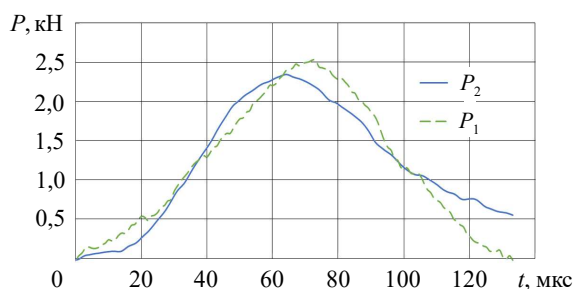


Рис. 2. Усилия, действующие на образец в процессе его нагружения

Некоторые кадры высокоскоростной съемки приведены на рис. 3. Графики роста деформаций во времени по двум взаимно перпендикулярным направлениям в середине образца, полученные с использованием технологии корреляции цифровых изображений, показаны на рис. 4. Графики роста напряжений во времени по двум взаимно перпендикулярным направлениям в середине образца, вычисленные по формулам (1) и (2) на основе прошедшего импульса деформации $\varepsilon^T(t)$, показаны на рис. 5. Эти графики построены до достижения максимума на прошедшем импульсе, который свидетельствует о спаде давления со стороны образца на опорный стержень

и, следовательно, начале его разрушения. Таким образом, время до начала образования диаметральной трещины в образце, определенное по импульсу деформации, составило 62 мкс.

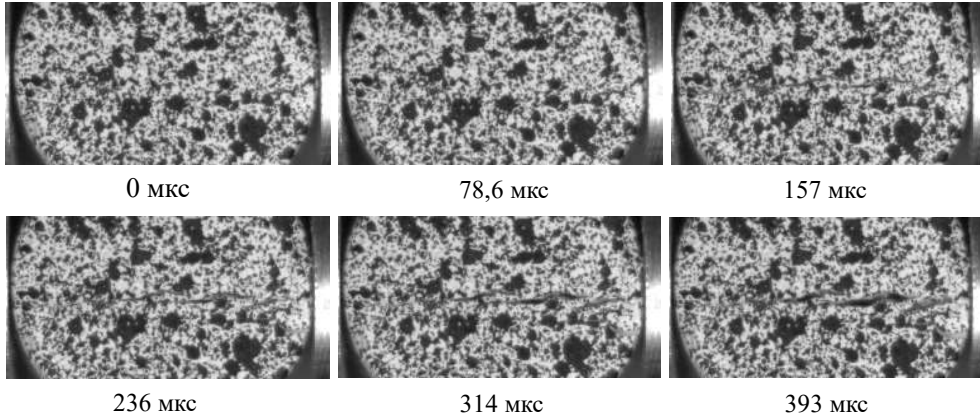


Рис. 3. Кадры высокоскоростной съемки процесса разрушения образца

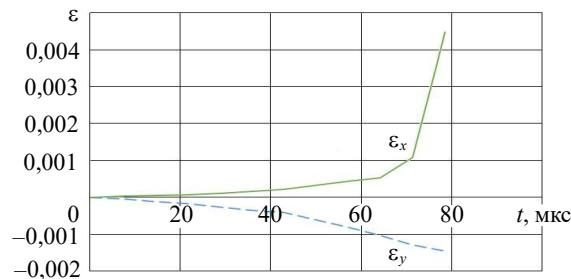


Рис. 4. Рост деформаций в центральной части образца в процессе его нагружения

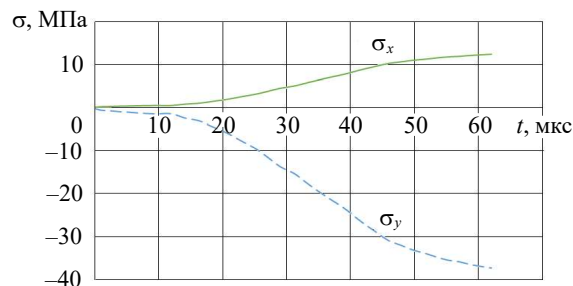


Рис. 5. Рост напряжений в центральной части образца в процессе его нагружения

При анализе изображений, полученных с помощью высокоскоростной съемки, появление трещины было замечено на кадре, соответствующем 79 мкс от начала нагружения. Можно отметить, что время до начала разрушения, определенное с использованием высокоскоростной камеры, условно и зарождение трещины началось раньше, поскольку, во-первых, процесс съемки дискретен, а во-вторых, на кадрах можно не заметить трещину с малой шириной ее раскрытия. Поэтому время до начала разрушения, определенное по прошедшему импульсу деформации мерного стержня, является более достоверным. Полученные зависимости напряжений и деформаций приводились к единому и постоянному шагу по времени в интервале 5–60 мкс

с использованием интерполяции, аналогично изложенному в [26]. После этого по формулам (5)–(7) вычислялись значения динамического модуля Юнга и коэффициента Пуассона, а также строились их графики в зависимости от времени, которые представлены на рис. 6 и 7. Средние значения динамического модуля Юнга и коэффициента Пуассона показаны горизонтальными линиями.

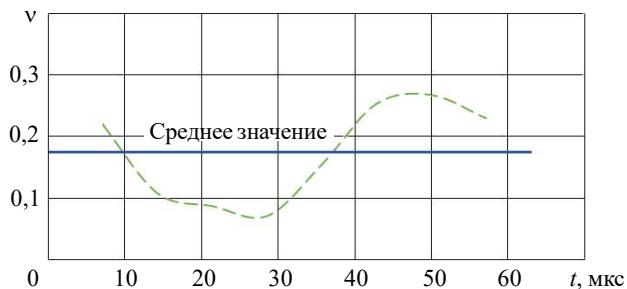


Рис. 6. Экспериментально полученные значения коэффициента Пуассона

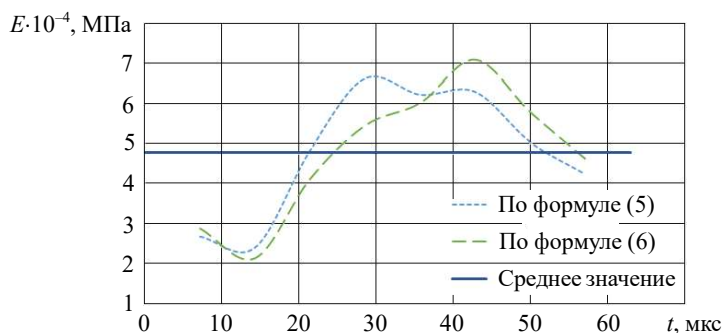


Рис. 7. Экспериментально полученные значения модуля упругости

Заключение

Развита модификация метода Кольского, предполагающая раскалывание цилиндрических образцов хрупких материалов. При апробации предложенной методики определения динамического модуля упругости и коэффициента Пуассона использовалась тензометрия и корреляция цифровых изображений. Приведенные результаты исследования показали применимость «бразильского теста» для определения указанных упругих механических характеристик хрупких сред при динамическом нагружении.

Список литературы

1. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading. *Proceedings of the Physical Society. Section B*. 1949. Vol. 62. Iss. 11. P. 676–700. DOI: 10.1088/0370-1301/62/11/302.
2. Chen W.W., Song B. *Split Hopkinson (Kolsky) bar. Design, Testing and Applications*. New York: Springer, 2011. 388 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7982-7>.
3. Dubey R., Jayaganthan R., Ruan D., Gupta N.K., Jones N., Velmurugan R. Energy absorption and dynamic behaviour of 6xxx series aluminium alloys: A review. *International Journal of Impact Engineering*. 2023. Vol. 172. Article No 104397. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104397>.
4. Alkhatib S.E., Sercombe T.B. High strain-rate response of additively manufactured light metal alloys. *Materials and Design*. 2022. Vol. 217. Article No 110664. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110664>.

5. Kidane A., Gowtham H.L., Naik N.K. Strain rate effects in polymer matrix composites under shear loading: a critical review. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*. 2017. Vol. 3. P. 110–132. <https://doi.org/10.1007/s40870-017-0098-2>.
6. Khosravani M.R., Weinberg K. A review on split Hopkinson bar experiments on the dynamic characterisation of concrete. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 190. P. 1264–1283. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.187>.
7. Thomas R.J., Sorensen A.D. Review of strain rate effects for UHPC in tension. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 153. P. 846–856. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.168>.
8. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Ломунов А.К., Ламзин Д.А. Исследование механических свойств мелкозернистого бетона при динамическом нагружении. *Приволжский научный журнал*. 2014. Т. 4. №32. С. 11–21.
9. Soufeiani L., Raman S.N., Jumaat M.Z.B., Alengaram U.J., Ghadyani G., Mendis P. Influences of the volume fraction and shape of steel fibers on fiber-reinforced concrete subjected to dynamic loading – A review. *Engineering Structures*. 2016. Vol. 124. P. 405–417. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.029>.
10. Брагов А.М., Карихалу Б.Л., Петров Ю.В., Ломунов А.К., Константинов А.Ю., Ламзин Д.А., Смирнов И.В. Экспериментально-теоретическое исследование динамического деформирования и разрушения фибробетона. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2014. Т. 80. №4. С. 57–63.
11. Bragov A.M., Gonov M.E., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Modin I.A. Response of fine-grained fiber-reinforced concretes under dynamic compression. *Materials Physics and Mechanics*. 2021. Vol. 47. Iss. 6. P. 962–967. DOI: 10.18149/MPM.4762021_14.
12. Xia K., Yao W. Dynamic rock tests using split Hopkinson (Kolsky) bar system – A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2015. Vol. 7. Iss. 1. P. 27–59. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.07.008>.
13. Zhang Q.B., Zhao J. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2014. Vol. 47. P. 1411–1478. <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0463-y>.
14. Bragov A.M., Lamzin D.A., Lomunov A.K. Experimental study of the processes of dynamic energy absorption of sand-lime brick. *Procedia Structural Integrity*. 2021. Vol. 32. P. 340–344. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.09.049>.
15. Lamzin D.A., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu. Investigation of strength and time properties of lime-sand brick under dynamic loading. *Materials Physics and Mechanics*. 2019. Vol. 42. Iss. 5. P. 517–521. DOI: 10.18720/MPM.4252019_4.
16. Lamzin D.A., Bragov A.M., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu., Dell'Isola F. Analysis of the dynamic behavior of sand-lime and ceramic bricks. *Materials Physics and Mechanics*. 2019. Vol. 42. Iss. 6. P. 691–698. DOI: 10.18720/MPM.4262019_1.
17. Caverzan A., Cadoni E., Prisco M. Tensile behaviour of high performance fibre reinforced cementitious composites at high strain rates. *International Journal of Impact Engineering*. 2012. Vol. 45. P. 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.01.006>.
18. Брагов А.М., Ломунов А.К., Константинов А.Ю., Ламзин Д.А. Модификация метода Кольского для испытаний хрупких материалов на растяжение. *Приволжский научный журнал*. 2016. Т. 2. №38. С. 9–17.
19. Bragov A.M., Lomunov A.K., Konstantinov A.Y., Lamzin D.A. A modified Kolsky method for determining the shear strength of brittle materials. *Technical Physics Letters*. 2017. Vol. 43. Iss. 1. P. 130–132. <https://doi.org/10.1134/S1063785017010175>.
20. Брагов А.М., Ломунов А.К., Константинов А.Ю., Ламзин Д.А., Баландин Вл.Вл. Оценка радиальной деформации образца на основе теоретико-экспериментального анализа методики динамических испытаний материалов в жесткой обойме. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. №4. С. 378–387. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2016-78-4-378-387>.
21. Nie H., Ma W., Wang K., Ren J., Cao J., Dang W. A review of dynamic multiaxial experimental techniques. *Review of Scientific Instruments*. 2020. Vol. 91. Iss. 11. P. 111501-1 – 111501-9. <https://doi.org/10.1063/5.0011121>.
22. Williams B., Sun Q., Heard W., Loeffler C., Graham S., Vankirk G., Nie X. Investigation

of strain-rate and pressure effects for high-strength concrete using a novel large-diameter triaxial Kolsky bar technique. *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 121. Article No 104085. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104085>.

23. Rodriguez T., Navarro C., Sanchez-Gálvez V. Splitting tests: An alternative to determine the dynamic tensile strength of ceramic materials. *Journal de Physique IV*. 1994. Vol. 4. P. 101–106. DOI: 10.1051/jp4:1994815.

24. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. *Теория упругости*. М.: Наука, 1979. 560 с.

25. СП 63.13330.2018 СНиП 52-01-2003 *Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения*. М. 2018. 143 с.

26. Ламзин Д.А. Применение интерполяции для обработки данных испытаний материалов с использованием среды программирования LabVIEW. *XII Всероссийский Фестиваль науки: Сб. докл.* Нижний Новгород, ННГАСУ. 2022. С. 130–134.

References

1. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading. *Proceedings of the Physical Society. Section B*. 1949. Vol. 62. Iss. 11. P. 676–700. DOI: 10.1088/0370-1301/62/11/302.

2. Chen W.W., Song B. *Split Hopkinson (Kolsky) bar. Design, Testing and Applications*. 2011. New York. Springer. 388 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7982-7>.

3. Dubey R., Jayaganthan R., Ruan D., Gupta N.K., Jones N., Velmurugan R. Energy absorption and dynamic behaviour of 6xxx series aluminium alloys: A review. *Int. J. Impact Eng.* 2023. Vol. 172. Article No 104397. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104397>.

4. Alkhatib S.E., Sercombe T.B. High strain-rate response of additively manufactured light metal alloys. *Mater. Des.* 2022. Vol. 217. Article No 110664. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110664>.

5. Kidane A., Gowtham H.L., Naik N.K. Strain rate effects in polymer matrix composites under shear loading: a critical review. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*. 2017. Vol. 3. P. 110–132. <https://doi.org/10.1007/s40870-017-0098-2>.

6. Khosravani M.R., Weinberg K. A review on split Hopkinson bar experiments on the dynamic characterisation of concrete. *Const. Build. Mater.* 2018. Vol. 190. P. 1264–1283. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.187>.

7. Thomas R.J., Sorensen A.D. Review of strain rate effects for UHPC in tension. *Const. Build. Mater.* 2017. Vol. 153. P. 846–856. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.168>.

8. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., Lamzin D.A. Issledovanie mekhanicheskikh svoystv melkozernistogo betona pri dinamicheskom nagruzhении [Study of mechanical properties of fine concrete at dynamic loading]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]*. 2014. Vol. 4. Iss. 32. P. 11–21 (In Russian).

9. Soufeiani L., Raman S.N., Jumaat M.Z.B., Alengaram U.J., Ghadyani G., Mendis P. Influences of the volume fraction and shape of steel fibers on fiber-reinforced concrete subjected to dynamic loading – A review. *Eng. Struct.* 2016. Vol. 124. P. 405–417. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.029>.

10. Bragov A.M., Karihaloo B.L., Petrov Y.V., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A., Smirnov I.V. Eksperimentalno-teoreticheskoe issledovanie dinamicheskogo deformirovaniya i razrusheniya fibrobetona [Experimental-theoretical study of dynamic deformation and fracture of fiber-reinforced concrete]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. [Factory Laboratory. Material Diagnostics]*. 2014. Vol. 80. Iss. 4. P. 57–63 (In Russian).

11. Bragov A.M., Gonov M.E., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Modin I.A. Response of fine-grained fiber-reinforced concretes under dynamic compression. *Mater. Phys. Mech.* 2021. Vol. 47. Iss. 6. P. 962–967. DOI: 10.18149/MPM.4762021_14.

12. Xia K., Yao W. Dynamic rock tests using split Hopkinson (Kolsky) bar system – A review. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 2015. Vol. 7. Iss. 1. P. 27–59. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.07.008>.

13. Zhang Q.B., Zhao J. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 2014. Vol. 47. P. 1411–1478. <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0463-y>.

14. Bragov A.M., Lamzin D.A., Lomunov A.K. Experimental study of the processes of dynamic energy absorption of sand-lime brick. *Procedia Structural Integrity*. 2021. Vol. 32. P. 340–344. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.09.049>.
15. Lamzin D.A., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu. Investigation of strength and time properties of lime-sand brick under dynamic loading. *Mater. Phys. Mech.* 2019. Vol. 42. Iss. 5. P. 517–521. DOI: 10.18720/MPM.4252019_4.
16. Lamzin D.A., Bragov A.M., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu., Dell'Isola F. Analysis of the dynamic behavior of sand-lime and ceramic bricks. *Mater. Phys. Mech.* 2019. Vol. 42. Iss. 6. P. 691–698. DOI: 10.18720/MPM.4262019_1.
17. Caverzan A., Cadoni E., Prisco M. Tensile behaviour of high performance fibre reinforced cementitious composites at high strain rates. *Int. J. Impact Eng.* 2012. Vol. 45. P. 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.01.006>.
18. Bragov A.M., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A. Modifikatsiya metoda Kolskogo dlya ispytaniy khrupkikh materialov na rastyazhenie [Modification of the Kolsky method for tension tests of brittle materials]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]*. 2016. Vol. 2. Iss. 38. P. 9–17 (In Russian).
19. Bragov A.M., Lomunov A.K., Konstantinov A.Y., Lamzin D.A. A modified Kolsky method for determining the shear strength of brittle materials. *Tech. Phys. Lett.* 2017. Vol. 43. Iss. 1. P. 130–132. <https://doi.org/10.1134/S1063785017010175>.
20. Bragov A.M., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A., Balandin V.I. Otsenka radialnoy deformatsii obraztsa na osnove teoretiko-eksperimentalnogo analiza metodiki dinamicheskikh ispytaniy materialov v zhestkoy oboyme [Estimation of radial strain of specimen on the basis of the theoretical and experimental analysis of a technique dynamic tests of materials in a rigid ferrule]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2016. Vol. 78. Iss. 4. P. 378–387 (In Russian).
21. Nie H., Ma W., Wang K., Ren J., Cao J., Dang W. A review of dynamic multiaxial experimental techniques. *Rev. Sci. Instrum.* 2020. Vol. 91. Iss. 11. P. 111501-1–111501-9. <https://doi.org/10.1063/5.0011121>.
22. Williams B., Sun Q., Heard W., Loeffler C., Graham S., Vankirk G., Nie X. Investigation of strain-rate and pressure effects for high-strength concrete using a novel large-diameter triaxial Kolsky bar technique. *Cem. Concr. Compos.* 2021. Vol. 121. Article No 104085. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104085>.
23. Rodriguez T., Navarro C., Sánchez-Gálvez V. Splitting tests: An alternative to determine the dynamic tensile strength of ceramic materials. *J. Phys. IV*. 1994. Vol. 4. P. 101–106. DOI: 10.1051/jp4:1994815.
24. Timoshenko S., Goodier J.N. *Theory of Elasticity*. New York. Toronto. McGraw-Hill Book Company, Inc. 1951. 519 p.
25. *Svod pravil 63.13330.2018 SNiP 52-01-2003 Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii. Osnovnye polozheniya [Concrete and Reinforced Concrete Structures. General Provisions]*. Moscow. 2018. 143 p. (In Russian).
26. Lamzin D.A. Primenenie interpoliyatsii dlya obrabotki dannykh ispytaniy materialov s ispolzovaniem sredy programirovaniya LabVIEW [Using interpolation to process material test data with the LabVIEW programming environment]. *XII Vserossiyskiy Festival Nauki. Sbornik dokladov. [XII All-Russian Science Festival. Collection of Reports]*. Nizhny Novgorod. NNGASU Publ. 2022. P. 130–134 (In Russian).

DETERMINATION OF THE DYNAMIC YOUNG'S MODULUS AND POISSON'S RATIO OF BRITTLE MATERIALS*

Lamzin D.A., Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Basalin A.V.

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

lamzin.dmitry@yandex.ru

Received by the Editor 2023/02/10

The article describes the development of a modification of the Kolsky method used for testing brittle materials at splitting. The scheme of the experiment involves the application of a dynamic load along diametrically opposite generatrices of the cylindrical surface of the test specimen. At the same time, it is in a biaxial stressed state and fracture into two halves from the action of tensile stresses. The method is based on the assumption that the material under test behaves elastically under equilibrium deformation of the specimen. This modification is proposed to be used to determine the dynamic Young's modulus and Poisson's ratio. The derivation of relations for calculating the indicated mechanical characteristics based on Hooke's law using experimental possibilities is given. Approbation of the proposed scheme for determining elastic constants was carried out when testing specimens of fireclay brick in the Hopkinson split bar system. The deformation impulses of measuring bars were recorded with the help of tensometry to assess the forces acting on the sample and calculate the stresses arising in its center. Deformations of the central part of the specimen were determined using digital image correlation technology. The obtained graphs of stresses and strains versus time had a different time step using the optical method in combination with tensometry. The arrays of the obtained stress and strain values were reduced to a single and constant time interval up to the moment of specimen failure using linear interpolation to process the experimental data based on the derived formulas. The study made it possible to construct graphs of the dynamic Young's modulus and Poisson's ratio versus time at the initial stage of specimen loading and to determine the average values of these elastic mechanical characteristics.

Keywords: Kolsky method, split Hopkinson bar, splitting, Young's modulus, Poisson's ratio, elasticity, brittle material.

*The research was carried out within the framework of the Russian Science Foundation, grant No 21-79-00151, <https://rscf.ru/project/21-79-00151>.