

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

ЧЖУАН ЮЙСЯН, Е. А. ТАРАСЕНКО

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: taraselen@mail.ru*

Изучены механические свойства и параметры акустической эмиссии хрупких материалов при различных скоростях нагружения. На основании теоретического анализа и данных, полученных при испытании образцов чугуна, угля и бетона, построены графики временной зависимости напряжения-деформации и акустических характеристик образцов. Механическая прочность и деформация образцов, а также параметры акустической эмиссии сравниваются со скоростью нагружения. Анализ механических свойств и акустических характеристик образцов позволяет получить информацию, которая может быть использована при инженерных расчетах.

Ключевые слова: хрупкие материалы, испытание образцов на сжатие, метод акустической эмиссии, механические характеристики

Хрупкие материалы относятся к материалам, которые разрушаются под действием внешней силы при малых относительных деформациях. Твердые материалы, такие как песок, уголь, чугун и бетон, являются типично хрупкими материалами, для которых характерно большое количество пустот и микротрещин как на поверхности, так и внутри. В процессе разрушения при деформации сжатия они обладают ярко выраженными нелинейными свойствами. На механические свойства материалов также влияют различные внешние и внутренние факторы, такие как скорость и время нагружения, плотность материала, температура и т. д.

При воздействии различных внешних сил хрупкий материал очень легко теряет стабильность, что приводит к разрушению деталей машин, строительных объектов (например, плотин, мостов, фундаментов зданий и сооружений), горных выработок, поэтому процесс динамического изменения хрупкого материала необходимо отслеживать. Метод акустической эмиссии (АЭ) позволяет своевременно получать информацию о неравновесном состоянии, повреждениях хрупких материалов, выявлять трещины, в том числе и в начальной стадии, отслеживать динамическое развитие внутренних дефектов в процессе нагружения и повреждения хрупких материалов в режиме реального времени, не разрушая их, что обеспечивает тем самым теоретическую основу и гарантию безопасной эксплуатации сложных технических объектов [1—9].

Для определения механических и акустических параметров хрупких материалов проводятся их испытания на сжатие. Исследования горных пород, в том числе угля, представлены в работах [10—17], чугуна — в работах [18—27], бетона — в работах [28—35]. В связи со сложным характером процесса разрушения в рассматриваемых материалах требуется комплексное изучение особенностей их динамического деформирования.

Экспериментальные исследования проводились на трехосной машине SAM-2000 (Чанчунь, Китай) (рис.1), используемой для испытаний на одноосное сжатие и управляемой микрокомпьютером серии Changchun Kexin sam-2000 (хост типа m). Основные технические характеристики установки: максимальное усилие — 2000 кН, эффективный диапазон измерения —

2—100 %, разрешение — 1/180 000, устройство для измерения усилия — датчик гидравлического давления (датчик нагрузки).



Рис. 1

Машина имеет несколько измерительных каналов связи; обладает функциями автоматического обнуления, калибровки, сбора и хранения данных испытаний в режиме реального времени; при испытаниях обеспечивает постоянную силу и деформацию, постоянное смещение и т.д., а также построение кривой напряжения-деформации для процесса испытаний и автоматический расчет результатов. Оборудование для испытаний может отображать одновременно несколько кривых зависимостей различных параметров в режиме реального времени.

На рис. 2 приведена схема контроля АЭ. Механические колебания, возникающие при деформации образца, преобразуются в электрические сигналы в преобразователе. Затем сигнал усиливается предварительным усилителем и поступает в блок регистрации данных АЭ, где фильтруется и усиливается основным усилителем и оцифровывается. Данные обрабатываются, записываются и сохраняются в компьютере.

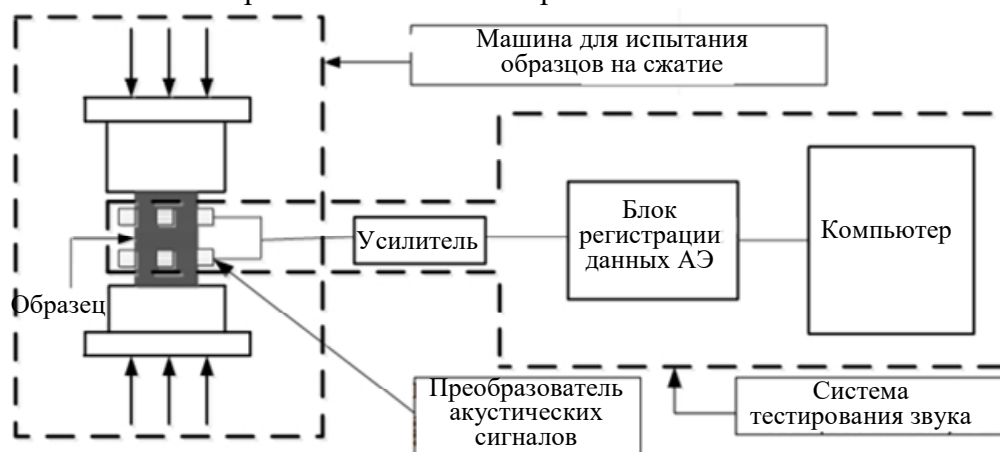


Рис. 2

Для испытаний были изготовлены образцы цилиндрической формы из чугуна (6 образцов) и угля (9 образцов) с номинальными диаметрами $D = 20$ мм и $D = 50$ мм, высотой $H = 40$ мм и $H = 100$ мм соответственно, а также образцы кубической формы из бетона (6 образцов) с размером стороны 100 мм (рис. 3). Все образцы были промаркированы и для каждого определены его масса и плотность.

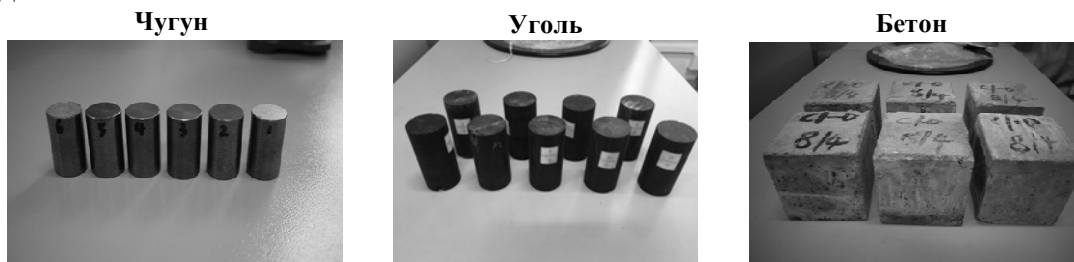


Рис. 3

Перед испытаниями проводились проверка уровня окружающего шума и, с помощью установки датчиков, калибровка скорости звука в тестовых образцах. Для чугуна скорость звука составляет от 1995 до 2103 м/с, для угля — от 321 до 1968 м/с, для бетона — от 3505 до 3842 м/с. Большой разброс значений для образцов угля, как показали дальнейшие испытания, связан с нарушением структуры и сколами при нарезании.

Далее образцы устанавливались в испытательную машину и подвергались одноосному сжатию. Скорость нагружения варьировалась для чугуна от 0,5 до 1,0 мм/с, для угля — от 0,016 до 0,032 мм/с, для бетона — от 0,4 до 1,2 мм/с.

Полученные при испытаниях данные обрабатывались с помощью программного обеспечения MatLab.

На рис. 4 представлены графики $\sigma(\varepsilon)$ зависимости напряжений от относительной деформации исследуемых образцов при постоянной скорости нагружения.

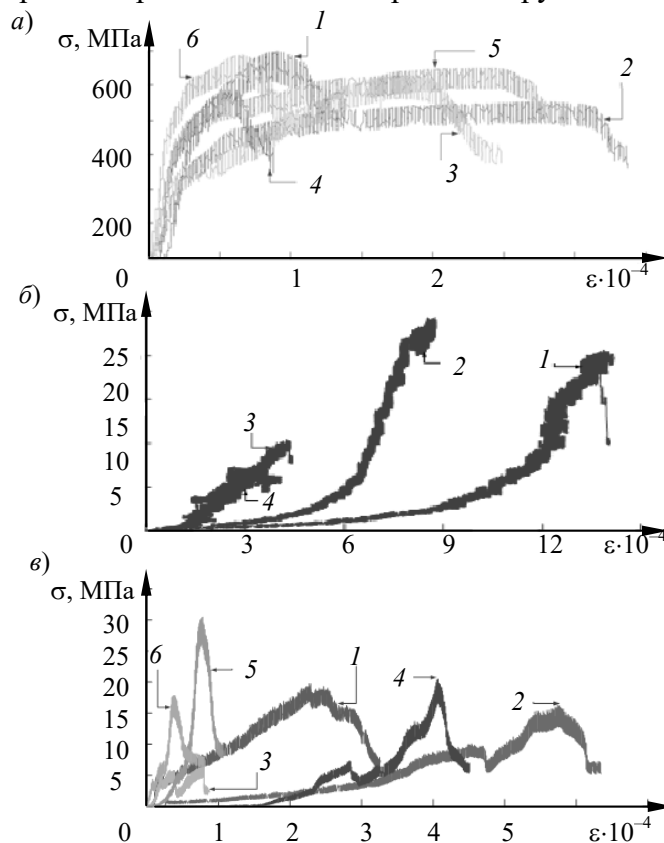


Рис. 4

Для образцов чугуна (рис. 4, а) условно можно выделить 4 стадии:

1 — *стадия упругой деформации*. На начальной стадии загрузки образцов кривая напряжения-деформации имеет линейный характер. На этом участке графики для отдельных образцов в основном совпадают, что указывает на относительную однородность внутренней структуры чугуна, а трещины и поры, как правило, отсутствуют; угол наклона кривых для различных образцов практически одинаковый — это означает, что на данном участке модуль упругости образцов не изменяется.

2 — *стадия пластической деформации*. На этом участке изменение напряжения, вызванного деформацией, становится медленнее. Угол наклона кривых напряжения-деформации образцов намного меньше — это указывает на то, что с увеличением времени нагружения осевое напряжение увеличивается и модуль упругости чугуна постепенно уменьшается.

3 — *стадия неравновесного состояния и разрушения*. На этом участке кривая напряжения-деформации практически параллельна горизонтальной оси. По мере увеличения осевого

напряжения выпуклость образцов становится все более очевидной, и мелкие трещины на поверхности начинают расширяться, что приводит к разрушению образцов. Для образцов 1, 4, 6 характерно внезапное разрушение при малых остаточных деформациях.

4 — *стадия после разрушения*. После разрушения образцов напряжение начинает уменьшаться, а кривая напряжения-деформации резко уходит вниз.

Образцы угля (9 шт.) были разделены на 2 группы в зависимости от степени их внешних повреждений при изготовлении. Зависимость (см. рис. 4, б) построена для группы из 4 образцов, имевших меньшие повреждения. В данном случае условно можно выделить следующие стадии: уплотнение небольших трещин в породе за счет нагрузки, постепенное расширение крупных трещин, что приводит к образованию сплошной трещины или ряду мелких трещин и к общему разрушению образца. При одноосном сжатии образцов угля при испытаниях без смазки его граней за счет возникающих сил трения поперечное растяжение будет меньше и при разрушении возникают сколовые трещины, ориентированные под углом около 45° к направлению сжатия.

В связи с тем, что бетон представляет собой искусственный конгломерат, состоящий из цементно-песчаной матрицы и зерен заполнителя, особенностью структуры бетона является его физическая и геометрическая неоднородность, что оказывает существенное влияние на кривые зависимости напряжений от относительной деформации. Для образцов бетона (рис. 4, в) условно можно выделить следующие стадии.

1 — *стадия уплотнения микротрещин*. Вследствие неоднородности структуры внутри и на поверхности бетонных образцов имеется большое количество микропор и трещин. На начальном этапе одноосного сжатия под действием внешнего давления микротрещины и поры внутри образца уплотняются. Кривая напряжения-деформации растет и имеет вогнутую форму, по мере увеличения осевого напряжения наклон кривой постепенно увеличивается. Это указывает на то, что когда осевое давление продолжает увеличиваться, модуль упругости образцов также продолжает увеличиваться.

2 — *стадия появления и развития микродефектов и возникновение вторичного поля напряжений*. Под действием осевой нагрузки крупные трещины внутри образца расширяются до образования более крупного дефекта. Этой стадии на графике соответствует прямолинейный участок, на котором модуль упругости изменяется незначительно. Длина кривых напряжения-деформации разных испытательных образцов очень различается, с одной стороны, из-за их неоднородной структуры, различного количества пор и трещин, а с другой — из-за разной скорости диффузии и степени активности внутренних дефектов конкретного образца.

3 — *образование сплошной трещины или множества трещин отрыва*. На этой стадии происходит активное распространение сплошной трещины или образование множества трещин отрыва, напряжение увеличивается, наступает стадия разрушения.

4 — *общее разрушение образца*. Когда нагрузка превысит предел прочности при сжатии наступает общее разрушение образца.

На рис. 5 представлены графики зависимости напряжения прочности и степени сжатия образцов (ψ) от скорости их нагружения (v).

Для образцов чугуна (рис. 5, а) скорость нагружения относительно мало влияет на значение напряжений в отличие от степени влияния на значение параметра ψ . Для образцов угля (рис. 5, б) с увеличением скорости нагружения напряжение образца вначале увеличивается, затем уменьшается. При испытаниях было отмечено, что существенное значение на их результаты оказывают дефекты (порезы, наличие трещин на поверхности), имевшиеся при подготовке образцов к испытанию. Для образцов бетона (рис. 5, в) с увеличением скорости нагружения напряжение сначала увеличивается, затем уменьшается, а затем вновь увеличивается. Степень сжатия образца также сначала уменьшается, затем увеличивается. Одна из при-

чин этого различия — физическая и геометрическая неоднородность свойств частиц материала, наличие внутри и на поверхности ряда дефектов, таких как трещины, поры и т.д.

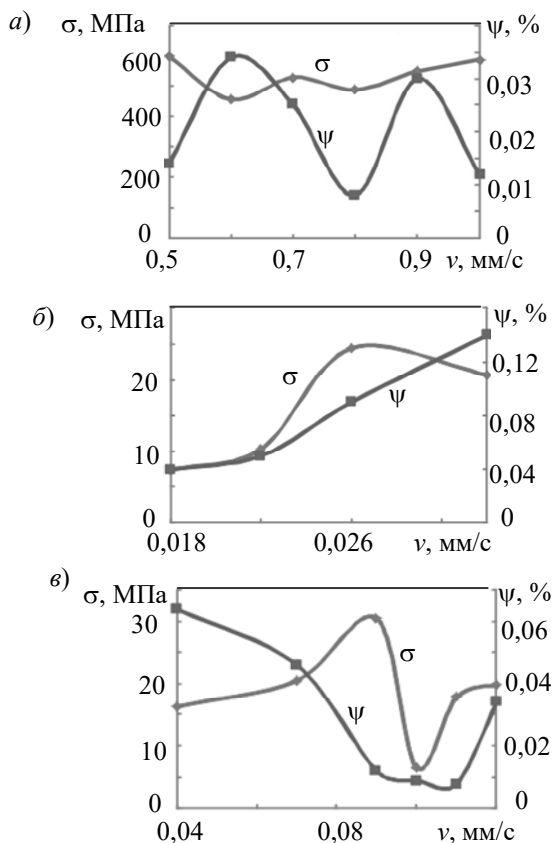


Рис. 5

Внешний вид образцов после испытаний показан на рис. 6. Образцы чугуна имеют бочкообразную форму, угол к образующим поверхностям, под которым происходит разрушение образцов, составляет 45° (при малом трении на торцах) и более 45° (при большой величине трения на торцах). В образцах угля наблюдались как X-образные сдвиги поверхностей, так и одиночные наклонные сдвиги. Все образцы бетона в результате испытаний были разрушены, в основном мелко раздроблены.

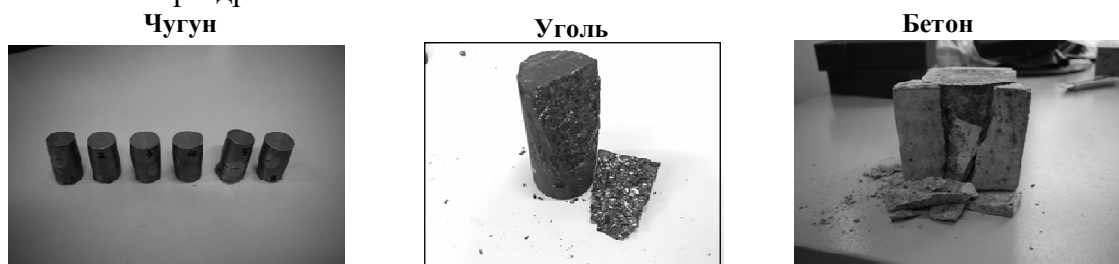


Рис. 6

Полученные в процессе испытаний образцов при различных скоростях нагружения параметры акустической эмиссии, такие как среднее и максимальное количество сигналов, средняя и максимальная энергия, среднее и максимальное число импульсов, позволили установить зависимости акустических и механических характеристик материалов.

Следует отметить, что для образцов бетона параметры акустической эмиссии во время испытаний сильно различаются, что может быть тесно связано с большой плотностью дефектов.

Для всех образцов проведен сравнительный анализ трехмерной карты зон локации акустической эмиссии и фактического разрушения. На рис. 7 показаны образцы угля (а) и бетона (б)

после испытаний, а также карты акустической эмиссии. По представленным результатам можно сделать вывод, что показания на соответствующей карте имеют высокую степень совпадения с поверхностью разрушения образца.

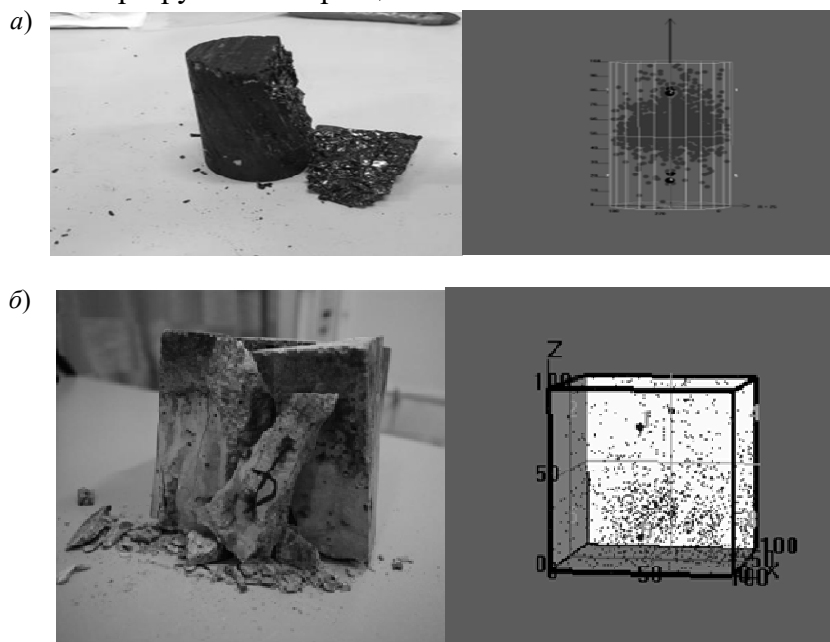


Рис. 6

Таким образом, метод акустической эмиссии позволяет фиксировать внутренние дефекты материала и получать информацию о его повреждении во времени, которая может быть использована при инженерных расчетах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Acoustic Emission Testing: Nondestructive Testing Handbook / Ed.: R. K. Miller, P. McIntire // American Society for Nondestructive Testing. 1987. Vol. 5. P. 275—310.
2. Vahaviolos S. J. Real time detection of microcracks in brittle materials using stress wave emission (SWE) // IEEE Transact. 1974. N 3, vol. PHP-10. P. 152—159.
3. Holcomb D. J., Costin L. S. Detecting damage surfaces in brittle materials using acoustics emissions // J. Appl. Mechanics. 1986. N 53(3). P. 536—554.
4. Lockner D. A. The role of acoustic emission in the study of rock fracture // Intern. Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts. 1993. N 30(7). P. 893—899.
5. Dai S. T., Labuz J. F. Damage and failure analysis of brittle materials by acoustic emission // J. of Material in Civil Engineering. 1997. N 9 (4). P. 200—205.
6. Parry D. L. Industrial application of acoustic emission analysis technology // Monitoring Structural Integrity by Acoustic Emission, STP 571: Symp. Proc., American Society for Testing and Materials. 1975. P. 150—183.
7. Fowler T. J. Recent developments in acoustic emission testing of chemical process equipment // Progress in Acoustic Emission IV: Proc. of the 9th Intern. Acoustic Emission Symp., The Japanese Society for Non-Destructive Inspection. 1988. P. 391—404.
8. Yurkov N. K., Kuznetsov E. N., Kuznetsov N. E. A comparative analysis of the accuracy and dynamic characteristics of two systems for converting the parameters of passive electrical quantities into on active quantity / Measurement Techniques. 2007. Vol. 50, N 2. P. 184—189.
9. Обзор применения акустической эмиссии для выявления микро- и нанодфектов / А. Г. Шайко-Шайковский, А. Т. Богорош, С. А. Воронов, К. В. Марченко // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 1 (13). С. 47—57.

10. Вознесенский А. С., Нарышкин Д. А., Тавостин М. Н. Пространственно-временная корреляция параметров акустической эмиссии на различных стадиях деформирования горных пород // Горный информ.-аналитический бюл. 2010. № 7. С. 189.
11. Вознесенский А. С., Нарышкин Д. А. Методические рекомендации по определению механических свойств горных пород на основе синхронных деформационных и акустико-эмиссионных измерений. М.: МГТУ, 2010.
12. Qin Xiqing, Li Zaoding et al. Mechanical model of acoustic emission from rocks and its application // J. Appl. Acoustics. 1992. N 11 (1). P. 1—4.
13. Zhao Xingdong, Tang Chunan, Li Yuanhui et al. Study of acoustic emission characteristics of the entire process of granite destruction // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2006. Vol. 25 (c2). P. 3673—3678.
14. Li Shouju, Li De, Wu Li, Cao Lijuan. Mesoscale modeling and fractal characteristics of the fracture process of a heterogeneous rock when tested for uniaxial compression // J. of China Coal Society. 2014. N 39 (5). P. 849—854.
15. Yang Yongjie, Chen Shaojie, Handong Dong. Test for acoustic emission of the compression fracture process of a coal sample // J. of China Coal Society. 2006. N 30 (5). P. 563—565.
16. Zhang Ming, Li Zhongkui, Yang Qiang, Feng Xiating. Damage model and statistical analysis of acoustic radiation of brittle materials // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2006. N 25 (12). P. 2494—2501.
17. Xi Daoying. Influence of the loading rate on the mechanical properties of the rock and the acoustic emissivity // Materials of the 4th National Conf. on Rock Dynamics. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1994.
18. Chen Fenlin. Analysis of stresses at fracture in compression of cast iron // J. of Taiyuan University of Technology. 2001. N 32 (4). P. 395—396.
19. Мерсон Д. Л., Черняева Е. В. Спектральные характеристики акустической эмиссии и механические свойства трубной стали в зависимости от температуры отпуска // Деформация и разрушение материалов. 2005. № 5. С. 24—27.
20. Мерсон Д. Л., Черняева Е. В., Мецераков Д. Е. Применение спектрального анализа акустической эмиссии для оценки состояния образцов стали 20 // Деформация и разрушение. 2009. № 1. С. 44—48.
21. Хаймович П. А. Барокриодеформирование металлических материалов // Материалы V Междунар. науч. конф. „Прочность и разрушение материалов и конструкций“, 12—14 марта 2008. Оренбург. Т. 1. С. 33—39.
22. Peng Qifeng, Li Musen, Ma Heqing. Study of the Process of Destruction of Cast Iron using Acoustic Emission Detection Technology. Shandong: Shandong Univ. of Technology, 1998.
23. Lee Kin, Tang Jiashi. Cast iron compression test studies // J. of Iron and Steel Research. 1998. N 10 (5). P. 57—58.
24. Han Wennyang, Ma Changpei. Experimental study of fracture upon fracture of cast iron specimens // Hebei Polytechnic University Journal. 1992. N 21 (1). P. 78—82.
25. Xia Gendi, Jiang Xian, Wang Jinping. Revision of unidirectional compression test and failure mode for cast iron // J. of Huainan University of Mining and Technology. 1998. N 18 (2). P. 45—47.
26. Feng Kunrong. Discussion of the direction of destruction of cast iron in compression // Mechanics and Practice. 2006. N 28 (2). P. 86—87.
27. Xue Fulin, Tong Jingxin, Zhao Bing, Yang Yijiu. Uniform compression failure of cast iron // Mechanics and Practice. 2005. N 27 (2). P. 84—85.
28. Hu Shaovei, Lu Jun, Fang Xiangqian. Investigation of the characteristics of acoustic emission during concrete failure tests // J. of Hydroelectronics. 2011. N 30 (6). P. 16—19.
29. Ji Hongguang, Tsai Meifeng. Relationship between acoustic emission and stress and strain parameters of concrete materials and its application // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2003. N 22 (2). P. 227—231.
30. Degala S. Acoustic Emission Monitoring of Reinforced Concrete Systems Retrofitted with CFRP. Univ. of Pittsburgh, 2008. 115 p.
31. Васильев Н. Е., Кульчицкий В. А., Мокогонов В. А. Аэродромные покрытия. Современный взгляд. М.: Физматлит, 2002. 528 с.

32. Бельх А. Г., Кукарских Л. А. Распространение ударных волн в бетонных покрытиях аэродрома при силовом воздействии колесных опор воздушных судов // Междунар. науч. институт „Educatio“. 2014. № 4. С. 128—131.
33. Грушко И. М., Алтухов В. Д. Вопросы теории структуры, прочности и разрушения бетонов // Технологическая механика бетона. 1986. С. 15—29.
34. Зайцев Ю. В. Моделирование деформации и прочности бетона методами механики разрушения. М.: Стройиздат, 1982. 196 с.
35. Krajcinovich D., Rinaldi A. Statistical-damage mechanics. Part I: Theory // Appl. Mechanics. 2005. Vol. 72, N 1. P. 76—85.

Сведения об авторах

Чжуан Юйсян

— магистрант; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа машиностроения,
E-mail: 444728057@qq.com

Елена Александровна Тарасенко

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа машиностроения;
E-mail: taraselen@mail.ru

Поступила в редакцию
07.05.2020 г.

Ссылка для цитирования: Чжуан Юйсян, Тарасенко Е. А. Определение механических и акустических характеристик хрупких материалов при различной скорости нагружения образцов // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 7. С. 673—681.

DETERMINATION OF MECHANICAL AND ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF BRITTLE MATERIALS AT VARIOUS RATES OF SAMPLES LOADING

Zhuang Yuxiang, E. A. Tarasenko

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
195251, St. Petersburg, Russia
E-mail: taraselen@mail.ru

Mechanical properties and characteristics of acoustic emission of brittle materials under various loading rates are studied. Based on performed theoretical analysis and data obtained during testing of samples of cast iron, coal, and concrete, graphs of the time dependence of stress-strain and acoustic characteristics of the samples are plotted. The mechanical strength and deformation of samples, as well as acoustic emission parameters, are compared with the loading rate. The analysis of mechanical properties and acoustic characteristics of samples provides information that can be used in engineering calculations.

Keywords: brittle materials, sample compression test, acoustic emission method, mechanical properties

REFERENCES

1. Miller R.K. and McIntire P. *Nondestructive Testing Handbook*, American Society for Nondestructive Testing, 1987, vol. 5, pp. 275–310.
2. Vahaviolos S.J. *IEEE Trans.*, 1974, no. 3(PHP-10), pp. 152–159.
3. Holcomb D.J, Costin L.S. *J. Appl Mech*, 1986, no. 3(53), pp. 536–554.
4. Lockner D.A. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics*, 1993, no. 7(30), pp. 893–899.
5. Dai S.T, Labuz J.F. *Journal of Material in Civil Engineering*, 1997, no. 4(9), pp. 200–205.
6. Parry D.L. *Monitoring Structural Integrity by Acoustic Emission*, STP 571: American Society for Testing and Materials, 1975, pp. 150–183.
7. Fowler T.J. *Progress in Acoustic Emission IV*, Proceedings of the Ninth International Acoustic Emission Symposium, The Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 1988, pp. 391–404.
8. Yurkov N.K., Kuznetsov E.N., Kuznetsov N.E. *Measurement Techniques*, 2007, February, no. 2(50), pp. 184–189.
9. Shayko-Shaykovskiy A.G., Bogorosh A.T., Voronov S.A., Marchenko K.V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem*, 2016, no. 1(13), pp. 47–57. (in Russ.)
10. Voznesenskiy A.C., Naryshkin D.A., Tavostin M.N. *Mining informational and analytical bulletin*, 2010, no. 7, pp. 189. (in Russ.)
11. Voznesenskiy A.C., Naryshkin D.A. *Metodicheskiye rekomendatsii po opredeleniyu mekhanicheskikh*

- svoystv gornyykh porod na osnove sinkhronnykh deformatsionnykh i akustiko-emissionnykh izmereniy* (Methodological Recommendations for Determining the Mechanical Properties of Rocks Based on Synchronous Deformation and Acoustic Emission Measurements), Moscow, 2010. (in Russ.)
12. Qin Xiqing, Li Zaoding et al. *J. Applied Acoustics*, 1992, no. 1(11), pp. 1–4.
 13. Zhao Xingdong, Tang Chunan, Li Yuanhui et al. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, no. 2(25), pp. 3673–3678.
 14. Li Shouju, Li De, Wu Li, Cao Lijuan. *Journal of China Coal Society*, 2014, no. 5(39), pp. 849–854.
 15. Yang Yongjie, Chen Shaojie, Handong Dong. *Journal of China Coal Society*, 2006, no. 5(30), pp. 563–565.
 16. Zhang Ming, Li Zhongkui, Yang Qiang, Feng Xiating. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, no. 12(25), pp. 2494–2501.
 17. Xi Daoying. *Materials of the 4th National Conference on Rock Dynamics*, Wuhan, Hubei Science and Technology Press, 1994.
 18. Chen Fenlin. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2001, no. 4(32), pp. 395–396.
 19. Merson D.L., Chernyaeva E.V. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2005, no. 5, pp. 24–27. (in Russ.)
 20. Merson D.L., Chernyaeva E.V., Meshcheryakov D.E. *Deformatsiya i razrusheniye*, 2009, no. 1, pp. 44–48. (in Russ.)
 21. Khaymovich P.A. *Prochnost' i razrusheniye materialov i konstruksiy* (Strength and Fracture of Materials and Structures), Materials of the V International Scientific Conference, March 12–14, 2008, Orenburg, vol. 1, pp. 33–39. (in Russ.)
 22. Peng Qifeng, Li Musen, Ma Heqing. *Shandong: Shandong University of Technology*, 1998.
 23. Lee Kin, Tang Jiashi. *Journal of Iron and Steel Research*, 1998, no. 5(10), pp. 57–58.
 24. Han Wennyang, Ma Changpei. *Hebei Polytechnic University Journal*, 1992, no. 1(21), pp. 78–82.
 25. Xia Gendi, Jiang Xian, Wang Jinping. *Journal of Huainan University of Mining and Technology*, 1998, no. 2(18), pp. 45–47.
 26. Feng Kunrong. *Mechanics and Practice*, 2006, no. 2(28), pp. 86–87.
 27. Xue Fulin, Tong Jingxin, Zhao Bing, Yang Yijiu. *Mechanics and Practice*, 2005, no. 2(27), pp. 84–85.
 28. Hu Shaovei, Lu Jun, Fang Xiangqian. *Journal of Hydroelectronics*, 2011, no. 6(30), pp. 16–19.
 29. Ji Hongguang, Tsai Meifeng. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, no. 2(22), pp. 227–231.
 30. Degala S. *Acoustic Emission Monitoring of Reinforced Concrete Systems Retrofitted with CFRP*, University of Pittsburgh, 2008, 115 p.
 31. Vasil'yev N.E., Kul'chitskiy V.A., Mokogonov V.A. *Aerodromnyye pokrytiya. Sovremennyy vzglyad* (Aerodrome Coverings. Modern Look), Moscow, 2002, 528 p. (in Russ.)
 32. Belykh A.G., Kukarskikh L.A. *Educatio*, 2014, no. 4, pp. 128–131. (in Russ.)
 33. Grushko I.M., Altukhov V.D. *Tekhnologicheskaya mekhanika betona*, 1986, pp. 15–29. (in Russ.)
 34. Zaytsev Yu.V. *Modelirovaniye deformatsii i prochnosti betona metodami mekhaniki razrusheniya* (Modeling the Deformation and Strength of Concrete by Methods of Fracture Mechanics), Moscow, 1982, 196 p. (in Russ.)
 35. Krajcinovich D., Rinaldi A. *Applied Mechanics*, 2005, no. 1(72), pp. 76–85.

Data on authors

- Zhuang Yuxiang** — Master Student; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Mechanical Engineering, E-mail: 444728057@qq.com
- Elena A. Tarasenko** — PhD, Associate Professor; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Mechanical Engineering; E-mail: taraselen@mail.ru

For citation: Zhuang Yuxiang, Tarasenko E. A. Determination of mechanical and acoustic characteristics of brittle materials at various rates of samples loading. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 7. P. 673–681 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-7-673-681