



**ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ОБРАЗЦОВ
НА ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД**

О. М. Усольцева, П. А. Цой, В. Н. Семенов

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: usoltseva57@mail.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Представлены результаты экспериментального исследования влияния размеров образцов роговика, известняка, песчаника, алевролита и рудосодержащих пород на их прочностные и деформационные характеристики. Проведены испытания на цилиндрических образцах трех диаметров 10, 30, 100 мм при одноосном сжатии и растяжении. Показано, что предел прочности уменьшается при увеличении размеров образцов из роговика, известняка, песчаника, алевролита. Для горных пород, содержащих вязкие включения, наблюдается некоторое повышение прочности с увеличением размера образцов. Для всех типов пород образцы меньшего размера проявляют хрупкий характер разрушения, с увеличением размера вязкость разрушения увеличивается. Дано объяснение полученных закономерностей изменения деформационно-прочностных характеристик в зависимости от склонности породы к вязкому или хрупкому разрушению, ее структурной и текстурной неоднородности с позиций двух типов масштабного эффекта — объемного и поверхностного.

Масштабный фактор, прочность, модуль Юнга, модуль спада

SAMPLE SIZE INFLUENCE ON STRESS-STRAIN PROPERTIES OF ROCKS

O. M. Usol'tseva, P. A. Tsoi, and V. N. Semenov

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: usoltseva57@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The results of an experimental study of the influence exerted by the sizes of samples of hornfels, limestone, sandstone, siltstone and ore-bearing rocks on their stress-strain properties are presented. Tests were performed on cylindrical samples of 10, 30, and 100 mm in diameter under uniaxial compression and tension. It is shown that ultimate strength decreases as the sizes of hornfels, limestone, sandstone, and siltstone samples increase. For rocks containing viscous inclusions, there is a slight increase in strength with increasing sample size. The samples of smaller size exhibit brittle failure for all types of rocks, and failure viscosity increases with increasing sample size. An explanation of the obtained patterns of change in stress-strain characteristics depending on rock tendency to viscous or brittle failure, its structural and textural inhomogeneity from the standpoint of two types of scale effect — volumetric and surface, is given.

Scale factor, strength, Young's modulus, modulus of decrease

Вследствие того, что горные породы являются структурно неоднородными, содержат неоднородности структуры различных размеров, трещины и текстурные особенности, которые в совокупности оказывают на них ослабляющее влияние с точки зрения прочности, масштабный

фактор является неизбежным следствием изменений инженерно-петрографических характеристик в зависимости от размеров и формы исследуемых объемов горной породы. В результате многих экспериментальных исследований было установлено, что прочность геометрически подобных образцов горных пород неодинакова. Во многих работах утверждается, что при увеличении размеров образца их прочность уменьшается [1–4]. Однако в ряде работ, где исследования выполнены на различных горных породах и геоматериалах с варьированием скоростей нагружения, доказывалось, что прочность с увеличением размера образца растет [5–12]. Кроме того имеют место еще два мнения: с увеличением размера образцов прочность не изменяется [13] и прочность увеличивается до некоторого значения, а затем падает [14, 15].

Объяснение этому расхождению впервые было дано в [16, 17]: существует два вида масштабного эффекта — объемный (главный) и поверхностный. Для реальных структурно-неоднородных объектов вероятность появления дефектов (трещина, слабый слой, слабое включение и т. д.) возрастает с увеличением их размеров. Отсюда следует, что прочность образца горной породы всегда будет выше, чем прочность массива. Поверхностный масштабный эффект существенно сказывается при испытаниях образцов малых размеров, причем чем меньше образец, тем влияние поверхностного масштабного эффекта сильнее. В зависимости от характера поверхностных дефектов он в одних случаях может усилить главный масштабный эффект, а в других уменьшить. При переходе же от образца к массиву основным является главный масштабный эффект. В работах [18, 19] сделана попытка учесть оба типа масштабных эффектов, а также их трансформацию одного в другой.

В данной работе изучение масштабного эффекта проводилось на цилиндрических образцах горных пород (роговик, известняк, алевролит, рудосодержащие породы: богатая руда, медистая руда, вкрапленная руда) трех различных диаметров: 10, 30, 100 мм, при отношении высоты к диаметру $h/d = 2$ при одноосном сжатии и $h/d = 1$ — растяжении. Фотографии некоторых образцов показаны на рис. 1. Во время исследований применялось следующее оборудование: для образцов диаметром 10 мм — микропресс Deben Microtest, 30 мм — сервогидравлический пресс Instron 8802, 60 мм — электромеханический пресс ИП-200. Образцы каждого диаметра испытаны на одноосное сжатие и косвенное растяжение (бразильская проба). Для каждого типоразмера и вида испытаний использовано по 2–3 образца. Нагружение осуществлялось в “жестком” режиме, скорость перемещения подвижной траверсы прессов составляла 0.1 мм/мин. В процессе эксперимента непрерывно регистрировалось напряжение и продольная деформация. Прочностные характеристики образцов представлены в табл. 1 и на рис. 2.



Рис. 1. Образцы алевролита $d = 60, 30, 10$ мм

Видно, что для группы рудных образцов наблюдается увеличение пределов прочности с увеличением диаметра образца от 10 до 60 мм при сжатии: для богатой руды в 1.4 раза; медистой руды — в 1.3 раза; вкрапленной руды — в 1.2 раза. При растяжении предел прочности также растет с увеличением диаметра от 10 до 60 мм: в 1.4; 1.3 и 1.3 раза для богатой, медистой и

вкрапленной руды соответственно. Для образцов роговика, песчаника и алевролита имеет место противоположная тенденция — с увеличением размера образца (диаметра от 10 до 60 мм) предел прочности снижается: для роговика при сжатии в 1.3 раза, при растяжении в 1.4 раза; для известняка при сжатии в 1.4 раза, при растяжении в 1.3 раза; песчаника при сжатии в 1.4 раза, при растяжении в 1.3 раза и для алевролита при сжатии в 1.3 раза, при растяжении в 1.3 раза.

ТАБЛИЦА 1. Пределы прочности образцов горных пород трех типоразмеров

Номер	Наименование горной породы	Предел прочности при сжатии, МПа	Предел прочности при растяжении, МПа	Диаметр, мм
1	Богатая руда	113	10.2	60
		95	8	30
		63	3.4	10
2	Медистая руда	164	25.5	60
		150	23	30
		87	13.1	10
3	Вкрапленная руда	102	19.9	60
		90	17	30
		71	12.1	10
4	Роговик	62	21.4	60
		103	27	30
		123	29.9	10
5	Известняк	34	7.8	60
		67	12	30
		109	17.04	10
6	Песчаник	112	13.7	60
		143	19	30
		161	22.8	10
7	Алевролит	152	21.5	60
		183	28	30
		223	34.6	10

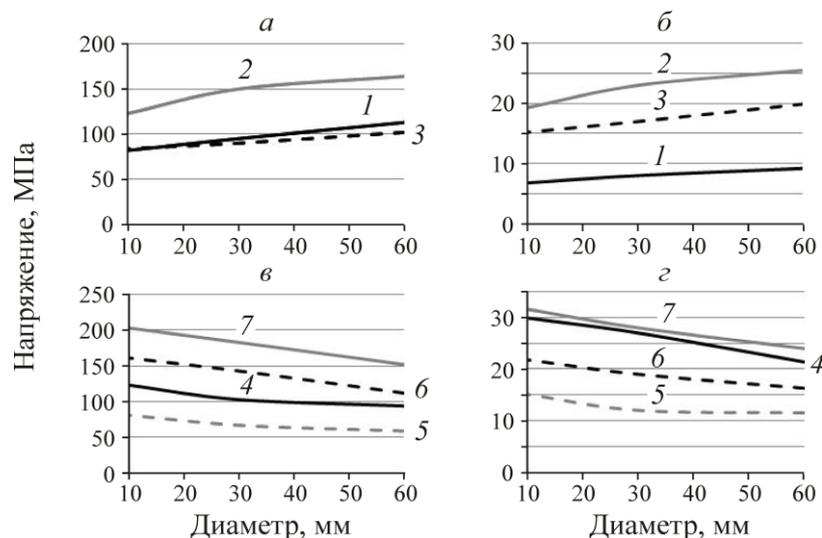


Рис. 2. Пределы прочности образцов горных пород при сжатии (*а, в*) и растяжении (*б, г*): 1 — богатая руда; 2 — медистая руда; 3 — вкрапленная руда; 4 — роговик; 5 — известняк; 6 — песчаник; 7 — алевролит

Выполнен анализ характера деформирования и разрушения образцов с использованием данных видеосъемки поверхности образца при испытаниях в микропрессе Deben Microtest и

диаграмм “напряжение – деформация” при одноосном сжатии образцов богатой, медистой, вкрапленной руды и алевролита диаметров 10 и 30 мм. На рис. 3, 4, в качестве примера, показаны фрагменты фотографий поверхности образцов богатой руды и алевролита диаметрами 10 мм и соответствующие диаграммы “напряжение – деформация” (рис. 3а, 4а) в момент, предшествующий разрушению, и аналогичные данные для последующего по времени кадра, соответствующего моменту образования магистральной трещины (рис. 3б, 4б). На рис. 3в, г и 4в представлены диаграммы “напряжение – деформация”, полученные при сжатии образцов диаметрами 30 мм из тех же горных пород.

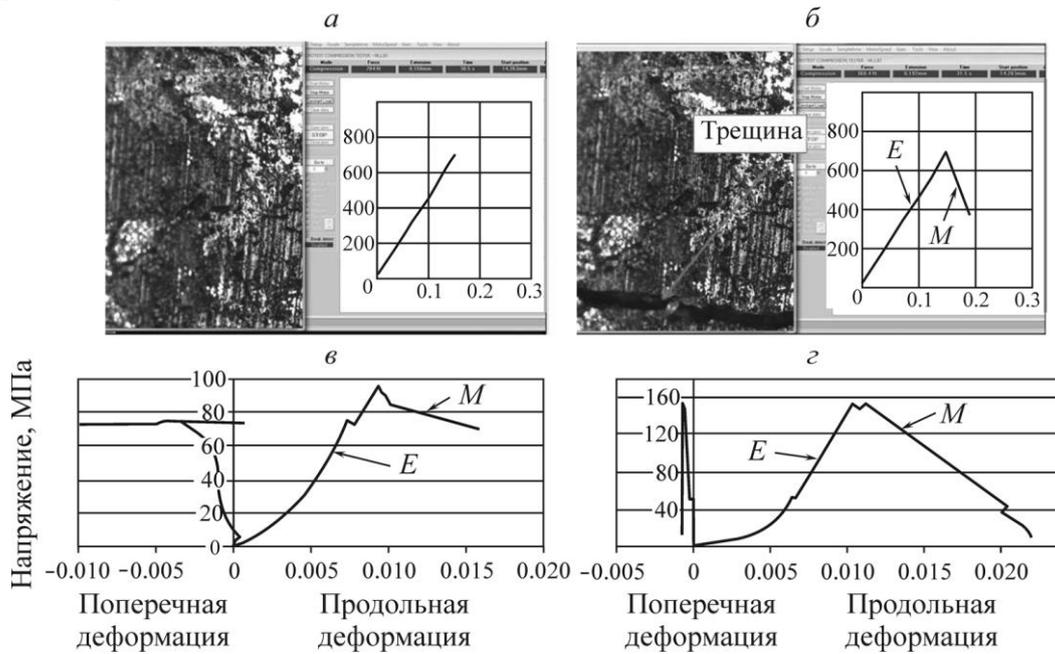


Рис. 3. Результаты испытаний образцов из богатой руды: фрагмент фотографии поверхности образца диаметра 10 мм и соответствующая диаграмма “напряжение – деформация” (а) в момент, предшествующий разрушению, и аналогичные данные для последующего по времени кадра, соответствующего моменту образования магистральной трещины (б); диаграммы “напряжение – деформация”, полученные при сжатии образцов диаметра 30 мм (в, г)

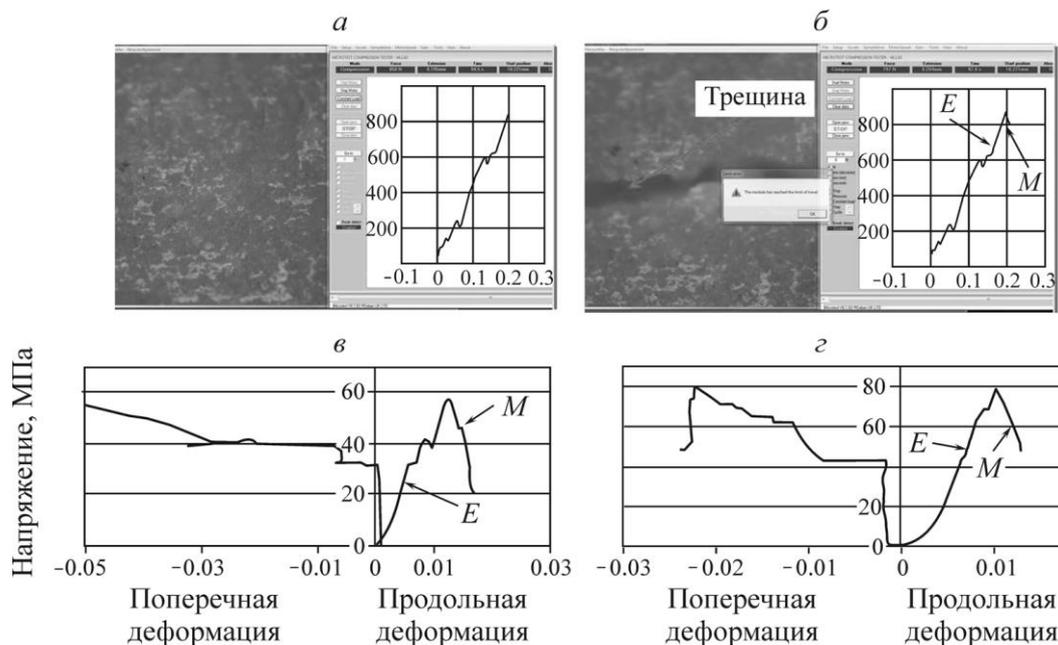


Рис. 4. Результаты испытаний образцов из алевролита: фрагмент фотографии поверхности образца диаметра 10 мм и соответствующая диаграмма “напряжение – деформация” (а) в момент, предшествующий разрушению, и аналогичные данные для последующего по времени кадра, соответствующего моменту образования магистральной трещины (б); диаграммы “напряжение – деформация”, полученные при сжатии образцов диаметра 30 мм (в, г)

В табл. 2 приведены значения модулей Юнга E и модулей спада M , рассчитанные на участке нагружения и запредельном участке деформирования для образцов диаметрами 10 и 30 мм (средние значения). Из сравнения модулей E и M можно заключить, что для всех образцов малого диаметра (10 мм) модуль спада превышает модуль упругости, т. е. образцы являются удароопасными и разрушение происходит по типу хрупкого. Для рудных образцов среднего диаметра (30 мм) во всех случаях модуль спада M меньше модуля упругости E , т. е. пластические свойства этих пород повышаются и характер разрушения становится более вязким. Для алевролита характерно хрупкое разрушение для обоих значений диаметров образцов.

ТАБЛИЦА 2. Модули Юнга и модули спада для рудных горных пород и алевролита

Наименование горной породы	Размер образца $d = 10$ мм		Размер образца $d = 30$ мм	
	E , МПа	M , МПа	E , МПа	M , МПа
Богатая руда	18.301	21.323	16.406	8.972
Медистая руда	15.002	18.541	12.453	7.991
Вкрапленная руда	17.923	19.837	15.672	10.323
Алевролит	13.724	15.685	11.839	13.452

На основе результатов испытаний образцов горных пород (роговик, известняк, песчаник, алевролит, рудосодержащие породы) трех различных размеров (цилиндры диаметрами 10, 30, 100 мм) при одноосном сжатии и растяжении получены зависимости пределов прочности от размеров образцов, а также при сжатии — модуля Юнга и модуля спада от диаметра. Закономерности изменения прочностных и деформационных характеристик образцов можно объяснить проявлениями масштабного эффекта первого рода (объемного) и второго (поверхностного) в зависимости от склонности породы к вязкому или хрупкому разрушению, ее структурной и текстурной неоднородности. При увеличении размеров образцов из алевролита происходит уменьшение прочности. Такая закономерность изменения свойств обусловлена масштабным эффектом первого рода, сущность которого заключается в том, что для реальных структурно неоднородных тел вероятность появления дефекта (трещины, слабого включения и т. п.) выше у крупных тел, поэтому с увеличением объема прочность образцов неизбежно должна падать. Для горных пород, имеющих вязкие включения (руды, содержащие медь, цинк, свинец, олово), с увеличением размера образца наблюдается некоторое повышение предела прочности с последующим небольшим уменьшением до постоянного значения. Пластичность таких пород способствует залечиваемости микротрещин, развивающихся в стадии пластической деформации породы, что затрудняет процесс перерастания микротрещин в макротрещины и наступления разрушения образца. Кроме того, для образцов меньших размеров в большей степени проявляется поверхностный масштабный эффект — нарушенность поверхностного слоя образца при обработке. Причем чем меньше образец, тем существеннее сказывается поверхностный эффект.

ВЫВОДЫ

На основе результатов испытаний цилиндрических образцов горных пород (роговик, известняк, песчаник, алевролит, рудосодержащие породы) трех различных диаметров 10, 30, 100 мм

при одноосном сжатии и растяжении получены закономерности изменения пределов прочности, модулей Юнга и модулей спада в зависимости от размеров образцов, структуры, состава, склонности породы к вязкому или хрупкому разрушению. При увеличении размеров образцов из роговика, известняка, песчаника, алевролита происходит уменьшение прочности. Такая закономерность изменения свойств объясняется масштабным эффектом первого рода (объемным). Для горных пород с вязкими включениями (руды, содержащие медь, цинк, свинец, олово) при увеличении размера образца наблюдается некоторое повышение предела прочности. Пластичность таких пород способствует залечиваемости микротрещин, развивающихся в стадии пластической деформации породы, что затрудняет процесс перерастания микротрещин в макротрещины и наступлении разрушения образца. Образцы меньшего размера проявляют хрупкий характер разрушения, с увеличением размера вязкость разрушения увеличивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Krauthammer T., Elfahala M. M., Lim J., Ohno T., Beppu M., and Markeset G.** Size effect for high strength concrete cylinders subjected to axial impact. *Int. J. Impact Eng.*, 2003, vol. 28, issue 9, pp. 1001–1016.
2. **Elfahal M. M. and Krauthammer T.** Dynamic size effect in normal–and high–strength concrete cylinders, *ACI Materials Journal*, 2005, vol. 102, issue 2, pp. 77–85.
3. **Elfahala M. M., Krauthammer T., Ohno T., Beppu M., and Mindess S.** Size effect for normal strength concrete cylinders subjected to axial impact, *Intl. J. Impact Eng.*, 2005, vol. 31, Issue 4, pp. 461–481.
4. **Tsoi P., Usol'tseva O., Persidskaya O., Semenov V., and Sivolap B.** About variation of meta-siltstone deformation strength properties under the different scales, 17 *Int. Multidisciplinary Scientific Geoconf. (SGEM 2017): Pro. of Conf.*, Bulgaria, Albena, 29 Jun–5 Jul, 2017, Albena: STEF92 Technology Ltd., 2017, issue 13, vol. 17, pp. 19–24.
5. **Chengzhi Q., Mingyang Wang, Jiping B., and Kairui L.** Mechanism underlying dynamic size effect on rock mass strength, *Intl. J. Impact Eng.*, 2014, vol. 68, pp. 1–7.
6. **Liang C. Y., Li X., Li S. D., He J. M., and Ma C. F.** Research on size effect of uniaxial compression properties of granite under medium and low strain rates, *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, vol. 32, issue 3, pp. 528–536.
7. **Hong L., Li X. B., Ma C. D. et al.** Study on size effect of rock dynamic strength and strain rate sensitivity, *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, vol. 27, issue 3, pp. 526–533.
8. **Wang Q. Z., Zhang S., and Xie H. P.** Rock dynamic fracture toughness tested with holed–cracked flattened brazilian discs diametrically impacted by SHPB and its size effect, *Exp. Mech.*, 2010, vol. 50, pp. 877–885.
9. **Bhagat R. B.** Mode I fracture toughness of coal, *Int. J. Min. Eng.*, 1985, vol. 3, pp. 229–236.
10. **Whittaker B. N., Singh R. N., and Sun G.** *Rock fracture mechanics: principles, design and applications.* Amsterdam: Elsevier; 1992, 570 pp. ISBN: 0444896848.
11. **Zhang Z. X.** An empirical relation between mode I fracture toughness and the tensile strength of rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2002, vol. 39, issue 3, pp. 401–406.
12. **Liang C. Y., Li X., Zhang H., Li S. D., He J. M., and Ma C. F.** Research on size effect of uniaxial compression properties of granite under medium and low strain rates, *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, vol. 32, issue 3, pp. 528–536.
13. **Baron L. I. and Kurbatov V. M.** On the influence of the scale factor in testing rocks for crushing. *Scientific research on the development of coal and ore deposits*, Moscow, Gosgortehizdat, 1959, pp. 128–136. (in Russian) [**Барон Л. И., Курбатов В. М.** К вопросу о влиянии масштабного фактора при испытаниях горных пород на раздавливание. *Научные исследования по разработке угольных и рудных месторождений.* — М.: Госгортехиздат, 1959. — С. 128–136.]

14. **Baryakh A. A., Asanov V. A., Pan'kov, I. L., Toksarov V. N., and Kiresuk M. A.** Study of the scale effect in the salt rock, *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2019, Issue 10, pp. 141–143. (in Russian) [Барях А. А., Асанов В. А., Паньков И. Л., Токсаров В. Н., Кирисюк М. А. Изучение масштабного эффекта в соляных породах // ГИАБ. — 2019. — Вып. 10. — С. 141–143.]
15. **Asanov V. A., Baryakh A. A., Zhigalkin V. M., Pankov I. L., Toksarov V. N., Usoltseva O. M., and Tsoi P. A.** Laboratory study of salt rock deformation, *Physical mesomechanics*, 2008, no. 11, pp. 14–18. (in Russian) [Асанов В. А., Барях А. А., Жигалкин В. М., Паньков И. Л., Токсаров В. Н., Усольцева О. М., Цой П. А. Лабораторное исследование деформирования соляных пород // Физическая мезомеханика. — 2008. — № 11. — С. 14–18.]
16. **Koifman M. I.** On the influence of size on the strength of rocks. Research of physical and mechanical properties of rocks in relation to problems of mountain pressure control, Moscow, Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1962, pp. 6–14 (in Russian) [Койфман М. И. О влиянии размеров на прочность горных пород // Исследование физико-механических свойств горных пород применительно к задачам управления горным давлением. — М.: Изд-во АН СССР, 1962. — С. 6–14].
17. **Koifman M. I.** Main scale effect in rocks and coals. Problems of mining mechanization, Moscow, Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1963, pp. 39–56. (in Russian) [Койфман М. И. Главный масштабный эффект в породах и углях. Проблемы механизации горных работ. — М.: Изд-во АН СССР, 1963.— С. 39–56].
18. **Bazant Z. P. and Yu Q.** Universal size low effect and effect of crack depth on quasi-brittle structure strength, *J. Eng. Mech.*, 2009, vol. 135, issue 2, pp. 78–84.
19. **Hoover C. G. and Bazant Z. P.** Comprehensive concrete fracture tests: Size effects of Types 1 and 2, crack length effect and postpeak, *Eng. Fract. Mech.*, 2013, vol. 110, pp. 281–289.