

А.С. Вознесенский, М.Н. Красилов, Я.О. Куткин, М.Н. Тавостин

ЛАБОРАТОРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РАСШИРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИЗГИБЕ*

Аннотация. Описана лабораторная система для испытания образцов горных пород при изгибе по трехточечной схеме, позволяющая производить однократные и многократные нагружения образцов-балок и останавливать испытания в состоянии предразрушения породы для последующего исследования изменений ее физических свойств. Особенностью такой системы является оценка деформированного состояния испытываемой балки непосредственно в ходе нагружения и его остановка для проведения акустических измерений на стадии предразрушения в самом начале образования трещины, приводящей к разлому балки. Система позволяет наращивать ее структуру и увеличивать количество регистрируемых информативных параметров. Увеличение скорости или изменение направления деформирования тензорезистора, наклеиваемого на образец-балку в центре снизу, позволяет выявлять стадию предразрушения и прогнозировать место выхода трещины на поверхность. Приведены примеры результатов испытаний при однократном и многократном нагружениях образцов гипсо-содержащих пород, а также при образовании трещины разрыва в центре и в стороне от него.

Ключевые слова: лабораторная система, изгиб, испытание, горная порода, образцы, предразрушение.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-10-0-132-137

Испытания образцов горных пород при изгибе являются одними из стандартизованных и используются для определения предела прочности при изгибе [1], а также при растяжении [2].

Последний вид испытаний требует специализированных приспособлений. Он является более трудоемким по сравнению с испытаниями на прочность при растяжении путем сжатия цилиндрических образцов по образующим [3], получившим название бразильского и нашедшего широкое распространение ввиду своей относительной простоты и возможности проведения испытаний на стандартных прессах без дополнительных приспособлений. Однако определение предела прочности при растяжении помимо таких испытаний должно также

проводиться и по другим схемам, в частности по трехточечной схеме испытания балок на изгиб, описанной в упомянутом выше ГОСТе 30629-2011. Механические прочностные испытания помимо прямого определения свойств пород интересны с точки зрения неразрушающего контроля и прогноза прочности с использованием регрессионных зависимостей между ней и различными физическими свойствами, в частности, акустическими. Измерение скоростей распространения упругих волн, а также затухания, декремента и добротности позволяет оценивать прочность пород, а также бетона без их разрушения [5–10]. Значительное количество работ при исследовании таких зависимостей касается прогнозирования предела проч-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 17-05-00570.

ности при сжатии, а количество публикаций, где рассматриваются испытания пород при изгибе гораздо меньше, что обуславливает необходимость проведения таких исследований. Для этого была разработана испытательная система, описанная ниже.

Особенностью такой системы является оценка деформированного состояния испытываемой балки непосредственно в ходе нагружения и его остановка для проведения акустических измерений на стадии предразрушения в самом начале образования трещины, приводящей к разлому балки.

Система построена по модульному принципу, что позволяет ее наращивать и увеличивать количество регистрируемых информативных параметров. Основой системы является универсальный автоматизированный испытательный комплекс АСИС производства компании ООО «НПП «Геотек», г. Пенза. Система предназначена для испытаний образцов пород как при однократном нагружении для определения прочности и деформируемости пород, так и при многократном для испытания образцов на усталость. Небольшие максимальные усилия машины нагружения, равные 30 кН, вполне достаточны для испытания образцов-балок на прочность при изгибе в соответствии с ГОСТ 30629-2011. К стандартной ба-

зовой части машины добавлены приспособления, позволяющие испытывать и регистрировать дополнительные показания и останавливать нагружение до хрупкого разрушения. Это дает возможность после остановки нагружения произвести дополнительные исследования образцов, включающие акустические измерения скорости распространения упругих волн и добротности образцов непосредственно перед их разрушением. Схема системы представлена на рис. 1.

Образец 1 устанавливается на двух опорах 2 и нагружается сверху подвижной третьей опорой 3, механически соединенной через измеритель силы 4 с блоком нагружения 5, а также с измерителем перемещения 6. Электрические выходы измерителей 4 и 6 соединены с измерительными входами блока управления 7, выход которого подключен к блоку нагружения 5. Блок 7 соединен также с компьютером управления нагрузкой и регистрации хода эксперимента 8. В ходе эксперимента на этом компьютере записываются показания нагрузки на образец. Система снабжена измерителем прогиба 9 и тензорезистором 10, размещенным в нижней центральной части балки, которые электрически подключены к блоку измерения и регистрации 11, а через него — к компьютеру измерения и регистрации 12. Он задает

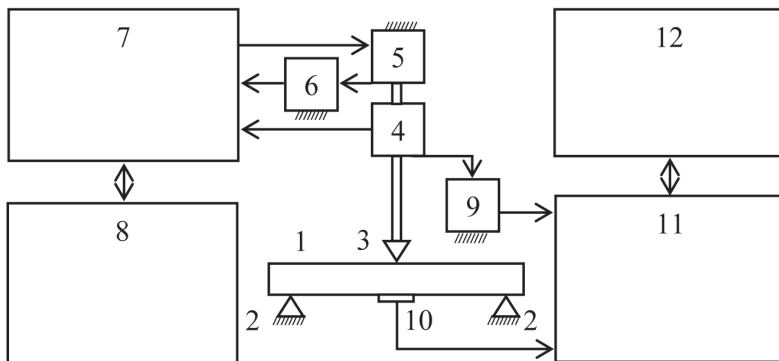


Рис. 1. Схема лабораторной установки для испытания образцов-балок горных пород
Fig 1. Schematic of laboratory test system for rock beam specimens

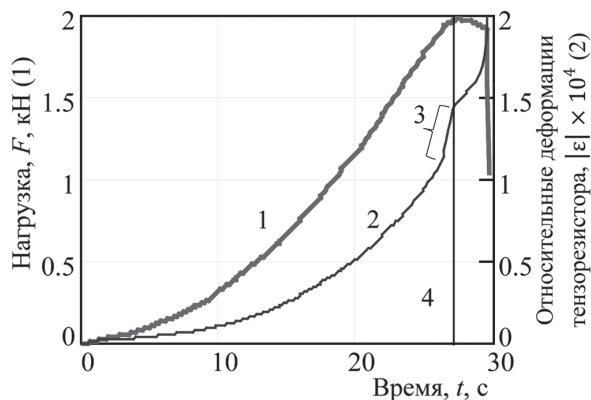


Рис. 2. Графики нагрузки (1), модуля деформаций тензорезистора (2), участок увеличения скорости деформаций тензорезистора (3) и момент времени остановки нагрузки (4)

Fig 2. Plot of load (1) deformation modulus of resistive strain sensor (2), increase in the rate of deformation of resistive strain sensor (3) and moment of loading killing (4)

режим снятия показаний во времени и осуществляет регистрацию деформаций балки. Тензорезистор 10 позволяет более детально наблюдать за образованием трещины в нижней части балки. Если трещина намечается в средней части балки, показания тензорезистора будут отмечать растяжение, если же трещина появляется в стороне от него, то сжатие. Остановка нагружения осуществляется при резком изменении показаний тензорезистора 10, предшествующему разрушению образца на две части.

Регистрация данных в измерительных частях системы ведется в текстовом

формате, поскольку современные носители информации имеют значительный объем и позволяют это делать без проблем. Текстовый формат данных позволяет без дополнительных конвертеров форматов данных работать с различным программным обеспечением, используемым для обработки. Учитывая разнообразие задач, с которыми приходится иметь дело при исследованиях, обработка осуществляется программами, написанными в среде Mathcad, что позволяет оперативно перестраивать алгоритмы и получать требуемые результаты в зависимости от поставленных задач.

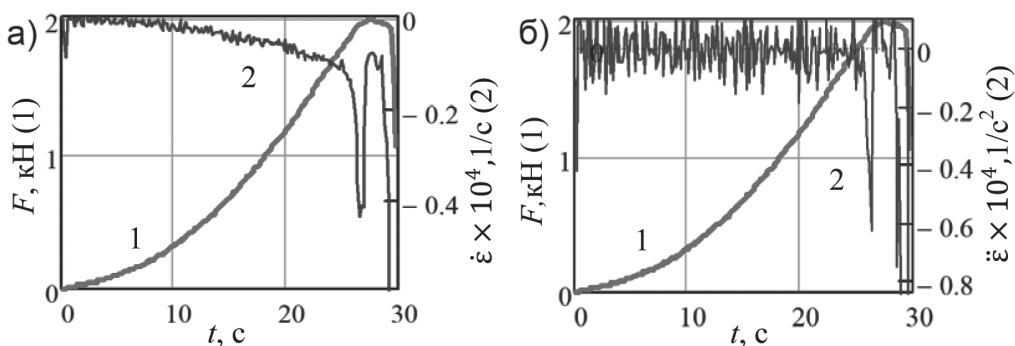


Рис. 3. Графики нагрузки (1), первой (а) и второй (б) производных (2) деформаций тензорезистора по времени

Fig 3. Plot of load (1) as well as the first (a) and (b) time derivatives (2) of deformation of resistive strain sensor

На рис. 2 представлен пример результатов испытаний на изгиб по трехточечной схеме балки размерами 40×40×200 мм гипсосодержащих пород Новомосковского месторождения гипса, а на рис. 3 — нагрузки, а также первой (рис. 3, а) и второй (рис. 3, б) производных показаний тензорезистора. На рис. 2 кривая 1 показывает изменение нагрузки, приложенной к опорам, кривая 2 — модуль относительных деформаций тензорезистора. В реальном устройстве последние имеют отрицательный знак. Первая часть кривой 2 на участке от 0 до 26 с может быть аппроксимирована квадратичной зависимостью. На участке 3 между 26 с и линией 4 происходит резкое возрастание наклона линии 2, что свидетельствует о формировании трещины в центральной части балки. Скорость роста нагрузки также уменьшилась ввиду снижения жесткости балки. После этого увеличение нагрузки было остановлено, но увеличение деформаций тензорезистора, хотя и замедлилось, но все равно продолжалось, т.е. трещина продолжала прорастать. При времени около 29 с машина была переключена на снижение нагрузки. В итоге трещина занимала лишь часть сечения образца. На рис. 2 резкому возрастанию деформаций тензорезистора соот-

ветствует возрастание модуля первой (рис. 3, а) и второй (рис. 3, б) производных, что может служить сигналом остановки нагружения. Графики, представленные на рис. 2 и 3, соответствуют случаю, когда трещина вышла на поверхность образца в пределах тензорезистора. Здесь при увеличении нагрузки направление изменения его показаний не меняется, только увеличивается скорость деформирования.

При испытании ряда образцов в части из них трещина выходила в сторону от центра за пределы тензорезистора. Ход кривой деформирования в этом случае другой, он показан на рис. 4. Здесь участок аномального изменения деформаций отмечен цифрой 1. При образовании трещины, выходящей за пределы тензорезистора, происходит снижение напряжений и сжатие породы слева и справа от нее, что на стадии нагружения приводит к изменению направления графика на противоположное.

Таким образом, регистрация деформаций в нижней средней части образца-балки дает возможность выявить состояние предразрушения и остановить нагружение, что позволит исследовать физические свойства образцов пород в этом состоянии и установить предвестники разрушения.

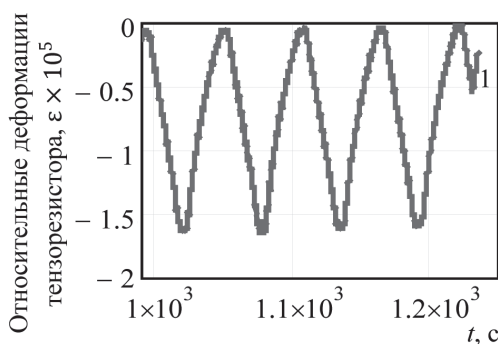


Рис. 4. Деформации на конечных циклах перед разрушением образца с выходом трещины за пределы тензорезистора и участок аномального изменения показаний (1)

Fig 4. Deformation in final cycles before failure of specimen with crack outlet beyond resistive strain sensor and section of anomalous change in data (1)

Выводы

1. Описана лабораторная система для испытания образцов горных пород при изгибе по трехточечной схеме, позволяющая производить однократные и многократные нагружения образцов-балок и останавливать испытания в состоянии предразрушения породы для после-

дующего исследования ее физических свойств.

2. Увеличение скорости или изменение направления деформирования тензорезистора, наклеиваемого на образец-балку в центре снизу, позволяет выявлять стадию предразрушения и прогнозировать место выхода трещины на поверхность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 21153.6-75. Породы горные. Метод определения предела прочности при изгибе. — М.: Изд. стандартов, 1982. — 3 с.
2. ГОСТ 30629-2011. Материалы и изделия облицовочные из горных пород. Методы испытаний. — М.: Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации (ЕАСС), 2011. — 59 с.
3. ГОСТ 21153.3-85. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении. — М.: Изд. стандартов, 1986. — 18 с.
4. *Matin S. S., Farahzadi, L., Makaremi, S., Chelgani S. C., Sattari G.* Variable selection and prediction of uniaxial compressive strength and modulus of elasticity by random forest. Applied Soft Computing. 2015. In press. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.06.030>.
5. *Renner J., Hettkamp T., Rummel F.* Rock mechanical characterization of an argillaceous host rock of a potential radioactive waste repository // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2000. 33(3). P. 153–178.
6. *Rhazi J., Kodjo S.* Non-destructive evaluation of concrete by the quality factor. *International Journal of the Physical Sciences*. 2010. Vol. 5(16). P. 2458–2465. Available online at <http://www.academicjournals.org/IJPS>.
7. *Voznesensky A. S., Kutkin Ya. O., Krasilov M. N.* Interrelation of the acoustic Q-factor and strength in limestone // *Journal of Mining Science*. 2015. 51(1). P. 21–30. <https://doi.org/10.1134/S1062739115010044>.
8. *Voznesenskii A. S., Kutkin Ya. O., Krasilov M. N., Komissarov A. A.* Predicting fatigue strength of rocks by its interrelation with the acoustic quality factor // *International Journal of Fatigue*. 2015. 77. P. 194–198. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.02.012>.
9. *Voznesenskii A. S., Kutkin Ya. O., Krasilov M. N., Komissarov A. A.* The influence of the stress state type and scale factor on the relationship between the acoustic quality factor and the residual strength of gypsum rocks in fatigue tests // *International Journal of Fatigue*. 2016. 84. P. 53–58. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.11.016>.
10. *Voznesenskii A. S., Krasilov M. N., Kutkin Ya. O., Tavostin M. N., Osipov Y. V.* Features of interrelations between acoustic quality factor and strength of rock salt during fatigue cyclic loadings // *International Journal of Fatigue*. 2017. 97. 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.12.027>. **ПЛАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Вознесенский Александр Сергеевич*¹ — доктор технических наук, профессор, e-mail: al48@mail.ru,

*Красилов Максим Николаевич*¹ — аспирант, e-mail: krasilov.maksim.93@mail.ru,

*Куткин Ярослав Олегович*¹ — кандидат технических наук, доцент, e-mail: kutnew@mail.ru,

*Тавостин Михаил Николаевич*¹ — кандидат технических наук, доцент, e-mail: mihail.tavostin@yandex.ru,

¹ МГИ НИТУ «МИСиС».

Laboratory system for expanded bending tests of rock specimens

Voznesenskiy A.S.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: al48@mail.ru,

Krasilov M.N.¹, Graduate Student, e-mail: krasilov.maksim.93@mail.ru,

Kutkin Ya.O.¹, Candidate of Technical Sciences,

Assistant Professor, e-mail: kutnew@mail.ru,

Tavostin M.N.¹, Candidate of Technical Sciences,

Assistant Professor, e-mail: mihail.tavostin@yandex.ru,

¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.

Abstract. The article describes a laboratory system for three-point bending tests enabling single and multiple loading of rock beams with the option of test cessation at pre-failure stage for the further investigation of change in the physical properties of rocks. The feature of such system is estimation of deformation state of a beam specimen directly in the course of loading and loading cessation at pre-failure stage, at the moment of initiation of a crack resulting in the beam fracture. The system allows expansion of its structure and increase in the number of informative parameters to be recorded. Higher rate or re-direction of deformation of a resistive strain sensor glued in the center of the bottom face of a beam specimen allows detecting the pre-failure stage and predicting the point of the crack outlet on the surface. The test data of single and multiple loading of gypsum-containing rock specimens, with crack initiation in the center and off-center of the specimens are presented.

Key words: laboratory system, bend, test, rock, specimen, pre-failure.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-10-0-132-137

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Grant No. 17-05-00570.

REFERENCES

1. Porody gornye. Metod opredeleniya predela prochnosti pri izgibe. GOST 21153.6-75 [Rocks. Method for determining the bending strength. State Standart 21153.6-75], Moscow, Izd. standartov, 1982, 3 p.
2. Materialy i izdeliya oblitsovochnye iz gornyykh porod. Metody ispytaniy. GOST 30629-2011 [Rocks. Test methods. State Standart 30629-2011], Moscow, Evraziyskiy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii (EASS). 2011, 59 p.
3. Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom rastyazhenii. GOST 21153.3-85 [Rocks. Methods for determining the tensile strength at uniaxial tension. State Standart 21153.3-85], Moscow, Izd. standartov, 1986, 18 p.
4. Matin S. S., Farahzadi, L., Makaremi, S., Chelgani S. C., Sattari G. Variable selection and prediction of uniaxial compressive strength and modulus of elasticity by random forest. Applied Soft Computing. 2015. In press. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.06.030>.
5. Renner J., Hettkamp T., Rummel F. Rock mechanical characterization of an argillaceous host rock of a potential radioactive waste repository. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2000. 33(3). P. 153–178.
6. Rhazi J., Kodjo S. Non-destructive evaluation of concrete by the quality factor. *International Journal of the Physical Sciences*. 2010. Vol. 5(16). P. 2458–2465. Available online at <http://www.academicjournals.org/IJPS>.
7. Voznesenskiy A. S., Kutkin Ya. O., Krasilov M. N. Interrelation of the acoustic Q-factor and strength in limestone. *Journal of Mining Science*. 2015. 51(1). P. 21–30. <https://doi.org/10.1134/S1062739115010044>.
8. Voznesenskii A. S., Kutkin Ya. O., Krasilov M. N., Komissarov A. A. Predicting fatigue strength of rocks by its interrelation with the acoustic quality factor. *International Journal of Fatigue*. 2015. 77. P. 194–198. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.02.012>.
9. Voznesenskii A. S., Kutkin Ya. O., Krasilov M. N., Komissarov A. A. The influence of the stress state type and scale factor on the relationship between the acoustic quality factor and the residual strength of gypsum rocks in fatigue tests. *International Journal of Fatigue*. 2016. 84. P. 53–58. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.11.016>.
10. Voznesenskii A. S., Krasilov M. N., Kutkin Ya. O., Tavostin M. N., Osipov Y. V. Features of interrelations between acoustic quality factor and strength of rock salt during fatigue cyclic loadings. *International Journal of Fatigue*. 2017. 97. 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.12.027>. [In Russ].