

Я.О. Куткин, М.Н. Красилов, Р.Р. Насибуллин, А.О. Тютчева

# ВЛИЯНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ИЗМЕНЕНИЯМИ ПРОЧНОСТИ И АКУСТИЧЕСКОЙ ДОБРОТНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗВЕСТНЯКА\*

**Аннотация.** В реальных условиях горного производства породы подвергаются как статическим, так и динамическим воздействиям, например, при взрывной отбойке. Рассмотрены результаты лабораторных исследований прочности мраморизованного известняка на образцах месторождения «Перевальное» Республики Дагестан при квазистатическом и динамическом нагружении. Получены зависимости изменения прочности от количества силовых воздействий в виде циклической нагрузки-разгрузки и удара. Установлены зависимости между акустической добротностью и прочностью для обоих видов нагружения. Динамические испытания проводились на экспериментальной установке, принцип действия которой основан на использовании разрезных стержней Гопкинсона, выполненных из гранита. Указанные зависимости при квазистатических испытаниях аппроксимируются логарифмической функцией вида  $\sigma_{ст} = 87,99 \cdot \ln(Q) - 96,53$  с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,99$ , а при динамических — экспоненциальной  $\sigma_{дин} = 30,56 \cdot e^{0,11 \cdot Q}$  с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,84$ . В квазистатических испытаниях при увеличении количества воздействий отмечается немонотонный характер изменения как прочности, так и акустической добротности. Зависимости, полученные при динамических испытаниях, демонстрируют уменьшение обеих величин.

**Ключевые слова:** акустическая добротность, прочность, квазистатическое нагружение, динамическое нагружение, разрезные стержни Гопкинсона, мраморизованный известняк.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-127-133

## Введение

Контроль и прогноз прочностных свойств горных пород является одной из приоритетных задач геомеханики и геоконтроля. Для решения этой задачи используются как традиционные механические, так и геофизические методы. Последние предполагают установление корреляционных связей между прочностью и соответствующим информативным физическим параметром. В частности при использовании акустических измерений в качестве такого парамет-

ра чаще всего выступает скорость распространения продольных и поперечных упругих волн ультразвукового диапазона частот.

Как свидетельствует многолетний опыт акустических исследователей [1, 2], взаимосвязь между скоростью и прочностью слабо отражает изменения последней на ранних этапах развития дефектообразования, когда размеры образующихся трещин меньше длины акустических волн, применяемых для прозвучивания. В то же время, в ряде работ [3, 4] по-

\* Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Фонда поддержки научно-проектной деятельности студентов, аспирантов и молодых ученых «Национальное интеллектуальное развитие» в рамках научного проекта № 17-35-80028 «мол\_эв\_а».

казано, что такие информативные акустические параметры, как добротность, коэффициент затухания упругих волн и другие, характеризующие энергетические потери в горной породе, обладают большей чувствительностью по отношению к изменениям прочности, чем скорости упругих волн.

Соответствующие исследования проводились при квазистатических циклических нагружениях образцов горных пород. Основным их результатом являлось доказательство существования взаимосвязи между акустической добротностью  $Q$  и прочностью  $\sigma_n$  пород. Учитывая, что в реальных условиях горного производства породы подвергаются не только статическим, но и динамическим воздействиям, например, при взрывной отбойке, необходимо исследование зависимостей  $\sigma_n(Q)$  в условиях динамических импульсных нагрузок.

Целью настоящей работы является установление на образцах горных пород взаимосвязей между изменениями их прочности и акустической добротностью в условиях не только квазистатических, но и динамических механических воздействий, а также их сравнение между собой.

### **Методическое обеспечение экспериментальных исследований**

Исследования проводились на образцах мраморизованного известняка размерами 25×25×50 мм месторождения «Перевальное», Республика Дагестан.

Определение акустической добротности осуществлялось путем измерения резонансной частоты и ширины полосы частот вблизи резонанса при прозвучивании образца гармоническим сигналом по формуле:

$$Q = \frac{f_0}{f_{\max} - f_{\min}},$$

где  $f_0$  — резонансная частота, определяемая по максимуму амплитуды гармонического сигнала, прошедшего через образец;  $f_{\max}$ ,  $f_{\min}$  — верхняя и нижняя частоты полосы пропускания сигнала на уровне  $1/\sqrt{2}$  от максимального значения амплитуды при резонансе.

Прочностные и усталостные квазистатические испытания проводились на универсальной тестовой машине Instron 150 LX. Режим усталостных испытаний включал в себя несколько циклов нагрузки-разгрузки, количество которых варьировалось от 10 до 50 с шагом 10.

Динамические испытания образцов горных пород осуществлялись с помощью специально сконструированной лабораторной установки, конструкция которой описана в [5]. Ее принцип действия основан на использовании разрезных стержней Гопкинсона [6, 7]. Отличительной особенностью лабораторной установки является материал из которого были изготовлены стержни, как и в работе [8] это был геоматериал, в нашем случае — гранит. Использование гранита позволило уменьшить потери от отражений на контакте стержня и образца породы, поскольку они имели близкие волновые сопротивления.

Для получения зависимости между акустической добротностью и прочностью как при квазистатических, так и при динамических испытаниях отбирались две группы по 10 образцов. Далее измерялось первоначальное значение акустической добротности каждого образца. После этого на 5-и образцах определялось начальное значение прочности путем доведения его до разрушения при медленно возрастающей нагрузке.

Оставшиеся образцы каждой группы подвергались разному количеству механических воздействий: водной группе — динамическим ударным, в другой группе — квазистатическим циклам нагружения-разгрузки. После повторных аку-

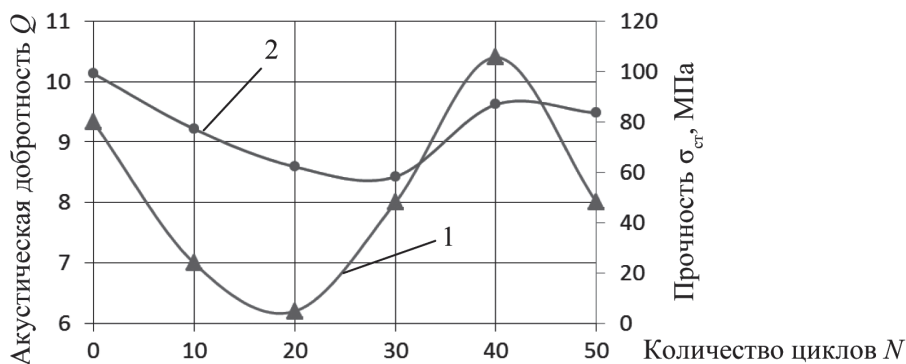


Рис. 1. Зависимости акустической добротности  $Q$  (1) и прочности  $\sigma_{cr}$  (2) при квазистатических испытаниях образцов

Fig. 1. Dependencies of the quality factor  $Q$  (1) and strength  $\sigma_{cr}$  (2) under quasistatic testing of samples

стических измерений добротности на образцах происходило определение их прочности путем разрушения при одноосном сжатии в режиме медленно возрастающей нагрузки.

### Результаты экспериментов

На рис. 1 представлены графики изменения добротности и прочности образцов мраморизованного известняка при квазистатическом нагружении в зависимости от количества циклов  $N$ , при этом минимальное и максимальное значение нагрузки составляло 5 и 60% от предела прочности при сжатии. Особенностью графиков является немонотон-

ный характер изменения как прочности, так и добротности.

На рис. 2 показаны аналогичные зависимости от количества ударных динамических воздействий.

В отличие от кривых, представленных на рис. 1, оба графика на рис. 2 демонстрируют уменьшение при увеличении количества ударных воздействий.

### Обсуждение результатов

На графиках рис. 1 обращает на себя ряд особенностей изменения прочности и акустической добротности при увеличении количества циклов усталостных воздействий.

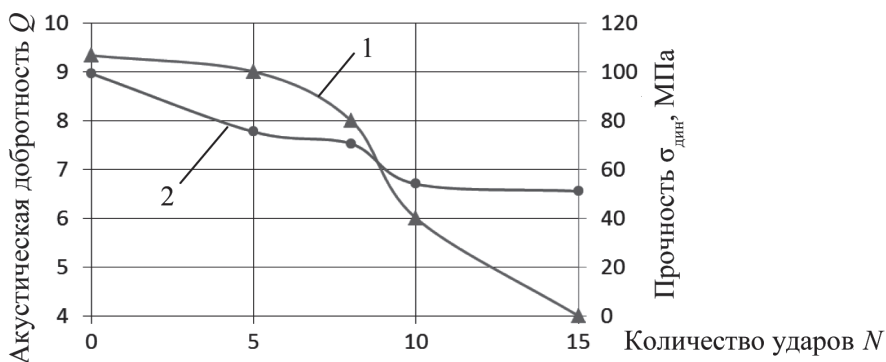


Рис. 2. Зависимости акустической добротности  $Q$  (1) и прочности  $\sigma_{дин}$  (2) при динамических испытаниях образцов

Fig. 2. Dependencies of the quality factor  $Q$  (1) and strength  $\sigma_{dyn}$  (2) under dynamic testing of samples

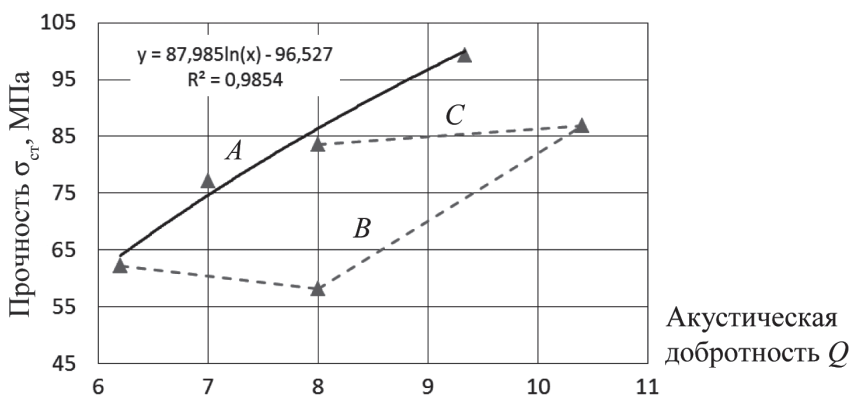


Рис. 3. Взаимосвязь прочности  $\sigma_{ст}$  и акустической добротности  $Q$  при квазистатических испытаниях образцов: А — количество циклов от 0 до 20, В — количество циклов от 20 до 40, С — количество циклов от 40 до 50

Fig. 3. The relationship between the quality factor  $Q$  and strength  $\sigma_{st}$  under quasistatic testing of samples: A — number of cycles from 0 to 20, B — number of cycles from 20 to 40, C — number of cycles from 40 to 50

При количестве циклов от 0 до 20 уменьшение акустической добротности происходит быстрее уменьшения прочности. Это свидетельствует о высокой чувствительности добротности при прогнозе прочности на ранних стадиях накопления повреждений. При количестве циклов от 20 до 40 происходит увеличение акустической добротности и прочности. Дальнейшее увеличение циклов нагрузки-разгрузки приводит к уменьшению обеих величин.

После достижения своих минимумов как прочность, так и добротность возрастают, т.е. происходит упрочнение, сопровождающееся повышением добротности. Аналогичный эффект наблюдался авторами и при испытании образцов мрамора [9]. Схожие явления упрочнения/разупрочнения наблюдаются в металлах в зависимости от их структурного состояния. Механизмы деформационного упрочнения при усталости связаны с взаимодействием движущихся дислокаций с различного рода препятствиями — с другими дислокациями, границами зерен, растворенными чужеродными атомами. В [10–12] отмечены три типа характерных кривых циклического упрочнения/разупрочнения.

Монотонное циклическое упрочнение под действием циклической нагрузки, например, наблюдается в нормализованных конструкционных сталях, которые испытываются на усталость при амплитудах, больших макроскопического предела текучести. Монотонное циклическое разупрочнение характерно для высокопрочных и холоднодеформированных металлических материалов при амплитудах напряжения ниже предела текучести.

Первоначальное циклическое разупрочнение и последующее циклическое упрочнение типично для нормализованных конструкционных сталей, если величина приложенной нагрузки не превышает макроскопический предел текучести. Изменение прочности, наблюдающееся у мраморизованного известняка, на наш взгляд схоже с третьим случаем. Оно связано с циклической микротечучестью и неомогенным пластическим течением материала.

После достижения максимума при 40 циклах происходит снижение обеих величин.

На рис. 3 показан график зависимости между акустической добротностью и прочностью образцов мраморизованно-

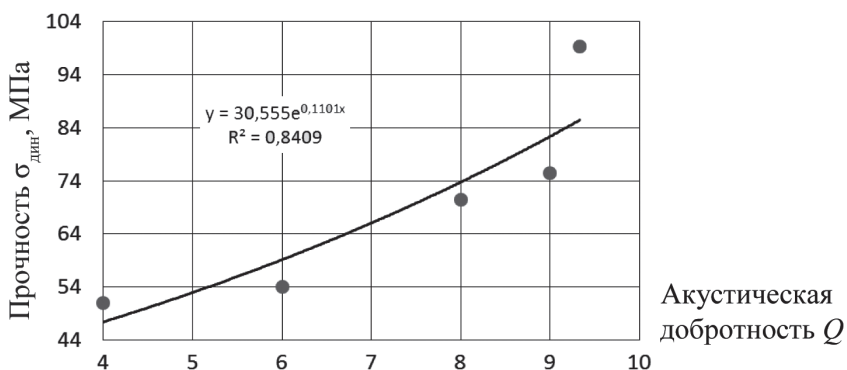


Рис. 4. Взаимосвязь прочности  $\sigma_{дин}$  и акустической добротности Q при динамических испытаниях образцов

Fig. 4. The relationship between the quality factor Q and strength  $\sigma_{dyn}$  under dynamic testing of samples

го известняка при квазистатических испытаниях. Первый участок зависимости соответствует снижению прочности и добротности и аппроксимируется логарифмической функцией вида  $\sigma_{ст} = 87,99 \cdot \ln(Q) - 96,53$ .

На рис. 4 показан график зависимости между акустической добротностью и прочностью образцов мраморизованного известняка при динамических испытаниях.

Данная зависимость аппроксимируется экспоненциальной функцией вида  $\sigma_{дин} = 30,56 \cdot e^{0,11 \cdot Q}$ . В результате разрушения образцов при динамическом воздействии магистральные трещины образуются вдоль линии нагружения, в отличие от квазистатического, когда разрушение происходит по косому сколу.

### Выводы

Разработана лабораторная экспериментальная установка, которая позволяет производить динамические испытания образцов геоматериалов при ударе. Установка базируется на использовании разрезных стержней Гопкинсона, выполненных из гранита. Она показала свою работоспособность при получении корреляционной связи между прочностью и акустической добротностью. Исследова-

ны зависимости между акустической добротностью, прочностью и количеством воздействий при циклических динамических и квазистатических нагружениях для мраморизованного известняка месторождения «Перевальное» Республики Дагестан.

В квазистатических испытаниях при увеличении количества воздействий отмечается немонотонный характер изменения, как прочности, так и акустической добротности.

Аналогичные зависимости, полученные при динамических испытаниях, демонстрируют уменьшение обеих величин. Зависимости между добротностью и прочностью, полученные при квазистатических испытаниях, аппроксимируются логарифмической функцией, а при динамических — экспоненциальной. Данная разница обусловлена различием систем трещин, образующихся при механических воздействиях.

Авторский коллектив выражает благодарность В.Б. Иванову за помощь в разработке, конструировании и изготовлении экспериментальной установки, д.т.н., проф. А.С. Вознесенскому за консультацию по рассматриваемому вопросу.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Keshavarz M., Pellet F.L., Loret B. Damage and Changes in Mechanical Properties of a Gabbro Thermally Loaded up to 1,000 °C // Pure and Applied Geophysics. 167. 2010. Pp. 1511–1523.
2. Voznesenskii A.S., KutkinYa.O., Krasilov M.N. Interrelation of the acoustic Q-factor and strength in limestone // Journal of Mining Science. 2015, January. Vol. 51. Issue 1. Pp. 23–30.
3. Лебедев А. В., Островский Л. А., Сутин А. М., Соустова И. А., Джонсон П. А. Резонансная акустическая спектроскопия при низких добротностях // Акустический журнал. — 2003. — Т. 49. — № 1. — С. 92–99.
4. Voznesenskii A.S., Krasilov M.N., KutkinYa.O., Tavostin M.N., Osipov Yu.V. Features of interrelations between acoustic quality factor and strength of rock salt during fatigue cyclic loadings // International Journal of Fatigue. 2017. Vol. 97. Pp. 70–76.
5. Куткин Я. О., Красилов М. Н., Насибуллин Р. Р. Установка для изучения свойств горных пород при динамических воздействиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 12. — С. 146–152.
6. Hopkinson B. A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 213. Pp. 437–456. DOI: 10.1098/rsta.1914.0010.
7. Kolsky H. An investigation of mechanical properties at very high rates of loading // Proceeding of the Physics Society of London. B62. 1949. Pp. 676–700.
8. Zhao J., Wu W., Zhang Q.B., Sun L. Some recent developments on rock dynamic experiments and modeling. Rock Dynamics and Applications State of the Art. London, 2013. Pp. 25–40.
9. Voznesenskii A.S., Kutkin Y.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. Vol. 77. Pp. 186–193.
10. Иванова В. С., Терентьев В. Ф. Природа усталости металлов. — М.: Металлургия, 1975. — 456 с.
11. Терентьев В. Ф. Усталость металлических материалов. — М.: Наука, 2002. — 248 с.
12. Терентьев В. Ф., Оксогоев А. А. Циклическая прочность металлических материалов. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. — 61 с. **ИИЭ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Куткин Ярослав Олегович<sup>1</sup> — кандидат технических наук, доцент, e-mail: kutnew@mail.ru,

Красилов Максим Николаевич<sup>1</sup> — ассистент кафедры, e-mail: krasilov.maksim.93@mail.ru,

Насибуллин Рамиль Раильевич<sup>1</sup> — студент, e-mail: ram4ik10@mail.ru,

Тютчева Анастасия Олеговна<sup>1</sup> — студент, e-mail: 9295947810@mail.ru,

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС».

---

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 12, pp. 127–133.

## Effect of static and dynamic loading on strength and Q-factor relationship

Kutkin Ya.O.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences,

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

Krasilov M.N.<sup>1</sup>, Assistant of Chair, e-mail: krasilov.maksim.93@mail.ru,

Nasibullin R.R.<sup>1</sup>, Student, e-mail: ram4ik10@mail.ru,

Tyutcheva A.O.<sup>1</sup>, Student, e-mail: 9295947810@mail.ru,

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

**Abstract.** In real mines, rocks are exposed to both static and dynamic forces, for instance, under blasting. This article discusses lab-scale testing of strength of marmorized limestone samples from the Perevalnoe deposit, Republic of Dagestan, subjected to quasi-static and dynamic loading. The curves of strength and force impact in the form of load–relief cycles and blowing are obtained. The relationship between the acoustic Q-factor and strength is determined for both regimes of loading. The dynamic testing plant

included the split Hopkinson pressure bars made of granite. The mentioned curves are approximated by the logarithmic function  $\sigma_{st} = 87,99 \cdot \ln(Q) - 96,53$  with the coefficient of determination  $R^2 = 0.99$  under the quasi-static testing and by the exponential function  $\sigma_{dyn} = 30,56 \cdot e^{0,11 \cdot Q}$  with  $R^2 = 0.84$  in case of the dynamic testing. Under the quasi-static loading, as the attacks are increased in number, the non-monotonous change is observed both in the strength and acoustic  $Q$ -factor of the samples. Under the dynamic loading, both values decrease.

**Key words:** acoustic  $Q$ -factor, strength, quasi-static loading, dynamic loading, split Hopkinson pressure bars, marmorized limestone.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-127-133

## ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported by the Russian Foundation of Basic Research and the R&D supporting fund for students, post-graduate students and young scientists—National Intelligent Development, Project No. 17-35-80028 mol\_ev\_a.

## REFERENCES

1. Keshavarz M., Pellet F.L., Loret B. Damage and Changes in Mechanical Properties of a Gabbro Thermally Loaded up to 1,000 °C. *Pure and Applied Geophysics*. 167. 2010. Pp. 1511–1523.
2. Voznesenskii A.S., KutkinYa.O., Krasilov M.N. Interrelation of the acoustic  $Q$ -factor and strength in limestone. *Journal of Mining Science*. 2015, January. Vol. 51. Issue 1. Pp. 23–30.
3. Lebedev A.V., Ostrovskiy L.A., Sutin A.M., Soustova I.A., Dzhonson P.A. Rezonansnaya akusticheskaya spektroskopiya pri nizkikh dobrotnostyakh [Acoustic resonance spectroscopy under low  $Q$ -factors], *Akusticheskii zhurnal*. 2003, vol. 49, no 1, pp. 92–99. [In Russ].
4. Voznesenskii A.S., Krasilov M.N., KutkinYa.O., Tavostin M.N., Osipov Yu.V. Features of interrelations between acoustic quality factor and strength of rock salt during fatigue cyclic loadings. *International Journal of Fatigue*. 2017. Vol. 97. Pp. 70–76.
5. Kutkin Ya.O., Krasilov M.N., Nasibullin R.R. Ustanovka dlya izucheniya svoystv gornykh porod pri dinamicheskikh vozdeystviyakh [Dynamic testing plant to study properties of rocks], *Gornyy informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2017, no 12, pp. 146–152. [In Russ].
6. Hopkinson B. A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 213. Pp. 437–456. DOI: 10.1098/rsta.1914.0010.
7. Kolsky H. An investigation of mechanical properties at very high rates of loading. *Proceeding of the Physics Society of London*. B62. 1949. Pp. 676–700.
8. Zhao J., Wu W., Zhang Q.B., Sun L. Some recent developments on rock dynamic experiments and modeling. *Rock Dynamics and Applications State of the Art*. London, 2013. Pp. 25–40.
9. 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. Vol. 77. Pp. 186–193.
10. Ivanova V.S., Terent'ev V.F. Priroda ustalosti metallov [Nature of metal fatigue], Moscow, Metallurgiya, 1975, 456 p.
11. Terent'ev V.F. *Ustalost' metallicheskih materialov* [Fatigue of metallic materials], Moscow, Nauka, 2002, 248 p.
12. Terent'ev V.F., Oksogoev A.A. *Tsiklicheskaya prochnost' metallicheskih materialov* [Cyclical strength of metallic materials], Novosibirsk, Izd-vo NGTU, 2001, 61 p.



На Международной выставке «IMPC 2018-EXPO»