

Взаимосвязь акустической добротности и прочности горных пород различных типов

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

Горный институт НИТУ «МИСиС». Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 4

(Статья поступила 05.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

Рассмотрены обобщенные эмпирические взаимосвязи динамических акустических характеристик горных пород различных генотипов с их прочностными свойствами. Показано, что связь акустической добротности с прочностью может иметь как монотонный, так и немонотонный характер. Указанные зависимости могут быть использованы для оценки неразрушающими методами прочности горных пород и ресурса подземных сооружений.

PACS: 43.35.+d, 91.60.Lj

УДК: 534.286.2: 534.283.2: 620.111.3: 620.178.3

Ключевые слова: акустическая добротность, прочность, горные породы, взаимосвязь, прогнозирование, неразрушающий контроль, ресурс.

ВВЕДЕНИЕ

В проведенных ранее экспериментах, оборудование и методика которых описаны в [1, 2], установлено, что прочность образцов осадочных, магматических и метаморфических горных пород может быть определена по акустической добротности на основании их взаимосвязи, предварительно получаемой с помощью усталостного циклического нагружения образцов между нагрузкой, близкой к нулю, и нагрузкой, составляющей заданную часть от предела прочности.

1. АНАЛИЗ МОНОТОННЫХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ МЕЖДУ АКУСТИЧЕСКОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ И ПРОЧНОСТЬЮ ГОРНЫХ ПОРОД

Представленные на рис. 1 взаимосвязи показывают, что для осадочных и магматических горных пород меньшим значениям акустической добротности соответствуют меньшая прочность горных пород. Причем при больших значениях прочности степень ее изменения меньше, чем акустической добротности. Это свидетельствует о высокой чувствительности акустической добротности на ранних стадиях разрушения, что существенно для неразрушающего контроля прочности.

Эти связи могут быть аппроксимированы логарифмической зависимостью, для известняка при максимальной нагрузке $0.3\sigma_{\max}$ она имеет вид

$$\sigma_{\text{ucs}} = 31.11 \times \ln(Q) + 71.44 \text{ МПа},$$

а при максимальной нагрузке $0.5\sigma_{\max}$

$$\sigma_{\text{ucs}} = 28.34 \times \ln(Q) + 62.03$$

при коэффициентах детерминации $R_1^2 = 0.98$ и $R_2^2 = 0.92$ соответственно. Обе зависимости близки друг к другу и отличаются незначительно, что свидетельствует о малом влиянии уровня механического нагружения при усталостных циклах.

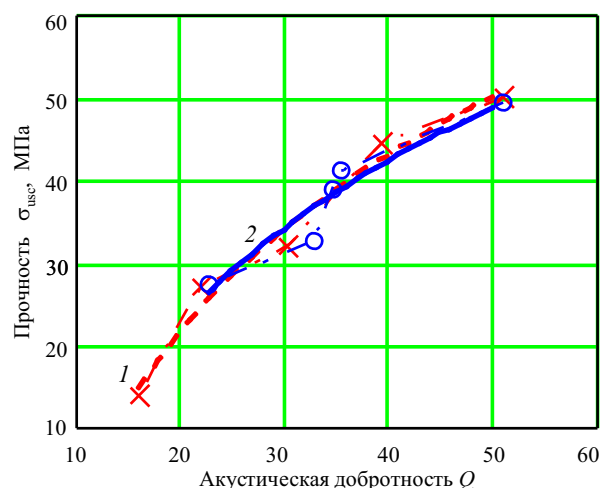


Рис. 1: Взаимосвязи между акустической добротностью Q и прочностью σ_{ucs} при сжатии для известняка при максимальной нагрузке 1 — $0.3\sigma_{\max}$, 2 — $0.5\sigma_{\max}$

Изменение прочности при механическом нагружении может быть описано с позиций двухстадийной модели кинетической теории прочности [3], согласно которой на первой стадии разрушения геоматериала микротрещины образуются равномерно по всему объему, не снижая значительно прочность. При этом акустическая добротность, реагируя на потери в среде из-за образующихся трещин, показывает существенное свое уменьшение. На прочность развитие микротрещиноватости оказывает меньшее влияние. На следующей стадии происходит группирование трещин в кластеры, приводя уже к существенному снижению прочности. Но поскольку количество трещин нарастает с той же скоростью, акустическая добротность уменьшается приблизительно также, как и на первой стадии.

Схожая зависимость наблюдается и для габбро. Она представлена на рис. 2. Аппроксимация экспериментальных данных логарифмической функцией дает зависимость

$$\sigma_{\text{ucs}} = 31.86 \times \ln(Q) + 47.25 \text{ МПа}$$

при коэффициенте детерминации $R^2 = 0.93$.

*E-mail: al48@mail.ru

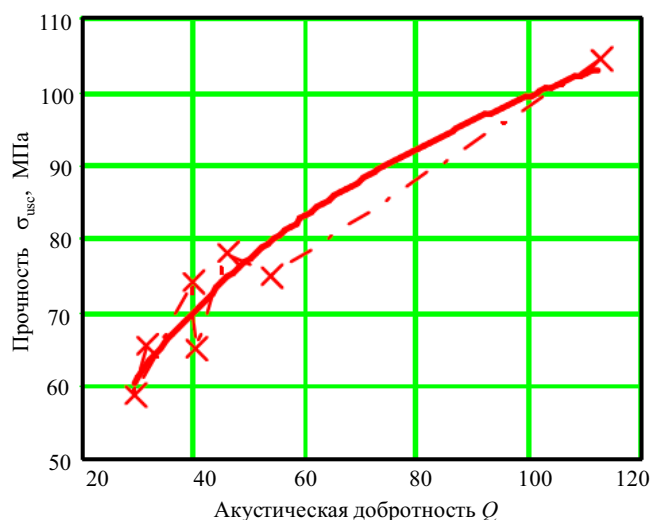


Рис. 2: Взаимосвязь между акустической добротностью Q и прочностью σ_{ucs} габбро Головинского месторождения

Здесь, как и для известняков, проявляется такая же закономерность — акустическая добротность отражает начальные стадии разрушения с большей чувствительностью, чем на последующих стадиях.

2. АНАЛИЗ НЕМОНОТОННЫХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ МЕЖДУ АКУСТИЧЕСКОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ И ПРОЧНОСТЬЮ ГОРНЫХ ПОРОД

Ход кривой $\sigma_{ucs}(Q)$ для мрамора, изображенной на рис. 3, сложнее, чем у известняка и габбро.

На участке A уменьшение акустической добротности сопровождается уменьшением прочности, на участке B при уменьшении акустической добротности прочность меняется незначительно, на участке B уменьшение акустической добротности сопровождается увеличением прочности, а на участке Γ наблюдается увеличение, как акустической добротности, так и прочности.

Аппроксимация первого участка A дает следующую зависимость

$$\sigma_{ucs} = 46.49 \times \ln(Q) + 64.87 \text{ МПа}$$

при коэффициенте детерминации $R^2 = 0.79$, который демонстрирует меньшее значение, чем у пород, описанных выше. Это обусловлено различием форм кривых взаимосвязей акустической добротности и текущей прочности.

В экспериментах, проводимых на образцах каменной соли [4] наблюдается аналогичная зависимость, как и для мрамора. График зависимости прочности от акустической добротности представлен на рис. 4.

Связи, представленные на рис. 4, могут быть аппроксимированы логарифмическими зависимостями. Для каменной соли (галита) при максимальной нагрузке

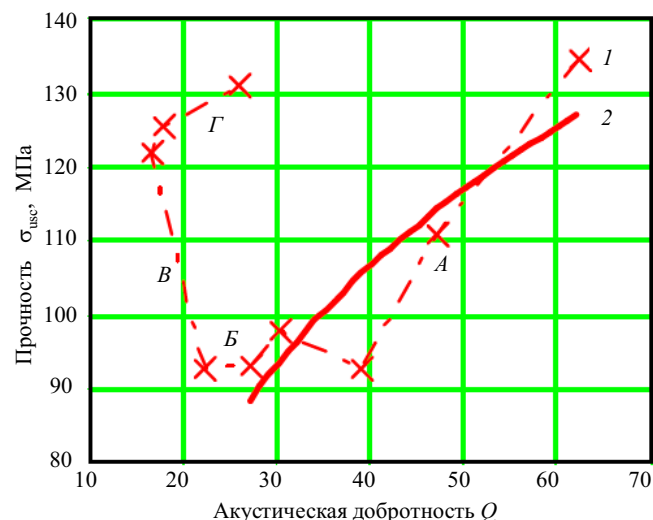


Рис. 3: Взаимозависимость между акустической добротностью Q и прочностью σ_{ucs} мрамора месторождений острова Thassos (1) и аппроксимирующая кривая ее первого участка (2) при уровне нагрузки $0.4\sigma_{max}$; на кривой 1 обозначены участки: A — одновременного уменьшения прочности и нагрузки; B — постоянного значения прочности; B — возрастания прочности при уменьшении добротности; Γ — возрастания прочности при увеличении добротности

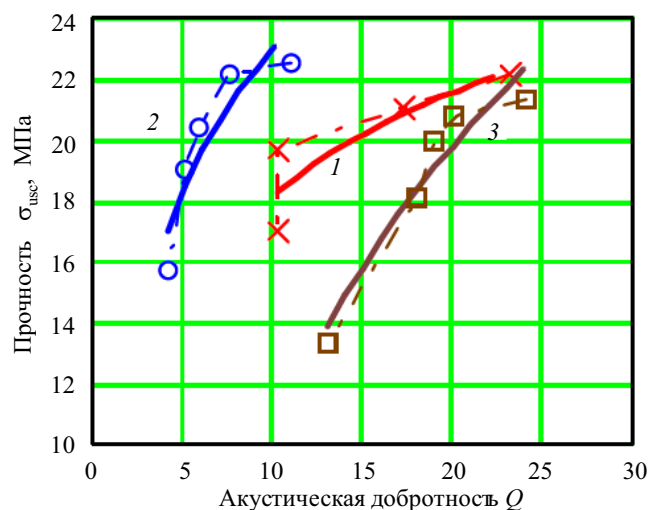


Рис. 4: Взаимосвязь между акустической добротностью Q и прочностью σ_{ucs} каменной соли (галита) при 1 — максимальной нагрузке $0.4\sigma_{max}$, 2 — $0.6\sigma_{max}$, 3 — $0.8\sigma_{max}$

$0.4\sigma_{max}$ такая связь имеет вид

$$\sigma_{ucs} = 4.89 \times \ln(Q) + 6.91 \text{ МПа},$$

при максимальной нагрузке $0.6\sigma_{max}$

$$\sigma_{ucs} = 6.70 \times \ln(Q) + 7.51 \text{ МПа},$$

а при максимальной нагрузке $0.8\sigma_{max}$

$$\sigma_{ucs} = 13.77 \times \ln(Q) - 21.45 \text{ МПа}$$

при коэффициентах детерминации $R_1^2 = 0.76$, $R_2^2 = 0.83$, $R_3^2 = 0.93$ соответственно.

Как следует из зависимостей, приведенных на рис. 4, на них существенно влияет уровень нагрузки, что должно быть учтено при их использовании для прогнозирования прочности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Породы различных типов демонстрируют различные зависимости между акустической добротностью Q и прочностью σ_{ucs} — монотонную и немонотонную. Это обусловлено соотношением процессов разрушения

и восстановления геоматериала. В любом случае зависимости участка, на котором отмечается уменьшение прочности при снижении акустической добротности, на практике могут быть использованы для прогнозирования прочности конструктивных элементов различных объектов без их разрушений путем измерения Q . Такими объектами являются, например, целики и кровля подземных горных выработок, разрушение которых может иметь катастрофические последствия, подземные хранилища углеводородов в соляных отложениях и другие объекты.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 17-05-00570 а.

-
- [1] Voznesenskii A. S., Kutkin Y. O., Krasilov M. N., Komissarov A. A. *Int. J. Fatigue*. 2015. **77**. P. 186.
 [2] Voznesenskii A. S., Kutkin Ya. O., Krasilov M. N., Komissarov A. A. *Int. J. Fatigue*. 2016. **84**. P. 53.
 [3] Дамаскинская Е. Е., Куксенко В. С., Томилин Н. Г. Фи-

- зика Земли. 1994. № 10. С. 47.
 [4] Voznesenskii A. S., Krasilov M. N., Kutkin Ya. O., Tavostin M. N., Osipov Yu. V. *Int. J. Fatigue*. 2017. **97**. P. 70.

The interrelation between the acoustic quality factor and the strength of rocks of various types

A. S. Voznesenskii^a, Ya. O. Kutkin, M. N. Krasilov

¹*Mining institute of the National University of Science and Technology «MISIS» (MISIS)
 Moscow, 119991, Russia
 E-mail: aal48@mail.ru*

The summary empirical interrelations of dynamic acoustic characteristics of rocks of different genotypes with their strength properties are considered. It is shown that the relation between the acoustic quality factor and the strength can be both monotonic and nonmonotonic. These dependencies can be used for non-destructive evaluation techniques of the rock strength and resources of underground structures

PACS: 43.35.+d, 91.60.Lj

Keywords: acoustic quality factor, strength, rocks, interrelation, forecasting, nondestructive testing, resource.

Received 05 July 2017.

Сведения об авторах

1. Вознесенский Александр Сергеевич — доктор техн. наук, профессор, профессор; тел.: (499) 230-25-93, e-mail: al48@mail.ru.
 2. Куткин Ярослав Олегович — канд. техн. наук, ст. преподаватель; тел.: (499) 230-25-93, e-mail: ftkp@mail.ru.
 3. Красилов Максим Николаевич — аспирант; тел.: (499) 230-25-93, e-mail: krasilov.maksim.93@mail.ru.
-