УДК 534.6.08: 691.212: 53.092: 620.173.2: 620.179.16: 622.833/.838

В.М.ЦАПЛЕВ, *д-р техн. наук, профессор, valery@convergences-fr.ru*
Р.М.ИВАНЮК, *аспирант, rivanyuk@phosagro.ru*
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ)
В.В.ЗВЕРЕВИЧ, *канд. техн. наук, доцент, kmd@spmi.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

V.M.TSAPLEV, *Dr. in eng. sc., professor, valery@convergences-fr.ru*
R.M.IVANYUK, *post-graduate student, rivanyuk@phosagro.ru*
Saint-Petersburg State Electrotechnical University (LETI)
V.V.ZVEREVICH, *PhD in eng. sc., associate professor, kmd@spmi.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ НЕЛИНЕЙНЫХ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОТРЕЩИНОВАТЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ГОРНЫХ ПОРОД

Исследовано влияние одноосного статического сжатия на модуль Юнга и внутреннее трение поликристаллических горных пород. Показано, что наличие микропор и микротрещин по-разному влияет на нелинейную упругость и неупругость материала. Это позволяет раздельно контролировать такие параметры, как микропористость и микротрещиноватость. Исследования выполнялись при помощи оригинальной установки ультразвуковым методом нагруженного составного вибратора.

Ключевые слова: поликристаллические горные породы, микропористость, микротрещины, нелинейная упругость, ультразвуковой контроль, внутреннее трение, статическое сжатие, ультразвуковой метод, нагруженный составной вибратор.

ULTRASONIC CONTROL OF THE NONLINEAR ELASTIC PROPERTIES OF THE MICROCRUMBLING POLYCRYSTALLINE ROCKS

The influence of the uniaxial static stress on the Young's modulus and on the internal friction of the polycrystalline rocks was studied. It was showed, that the effects of micropores and microcracks on the nonlinear elasticity and unelasticity of material are different. This makes possible different control of such parameters as microporosity and microcracking. The study was performed using the original method of loaded complex oscillator.

Key words: polycrystalline rocks, microporosity, microcracks, nonlinear elasticity, ultrasonic control, internal friction, static stress, ultrasonic method, loaded complex oscillator.

Одним из наиболее важных требований, предъявляемых к качеству облицовочных материалов, применяемых в промышленности и строительстве, являются показатели микропористости и микротрещиноватости. Эти два параметра определяют и некоторые другие параметры, устанавливаемые стандартом, такие, например, как прочность и водопоглощаемость. Считается (хотя это и не всегда справедливо), что наличие микропор уменьшает прочность материала и не влияет (или мало влияет) на поглощение влаги, если поры закрытые. Наличие микротрещин, напротив, приводит к резкому увеличению способности материала поглощать влагу [1]. Открытые поры также приводят к

этому эффекту. В этом смысле микротрещиноватость и открытая микропористость оказывают сходное влияние на свойства облицовочного материала.

Однако связь микротрещиноватости с прочностью материала не столь однозначна. Если материал подвергается нагрузке, то микротрещины, ориентированные вдоль оси сжатия, вызывают снижение прочности. Трещины под нагрузкой развиваются, модули упругости уменьшаются и материал подвержен разрушению на более ранней стадии, чем сплошной материал. Кроме того, постепенное развитие трещин приводит к появлению ползучести, также уменьшающей модули упругости, но теперь уже в зависимости от времени. Порог прочности также снижается. Трещины же, ориентированные поперек сжатия, наоборот, под воздействием сжатия залечиваются, и материал упрочняется. Ползучесть также имеет место, но значительно более кратковременная. Обусловленная такими трещинами водопоглощаемость снижается.

Таким образом, представляется актуальной необходимость эффективного контроля названных параметров. Однако существующие методы нельзя признать удовлетворительными. ГОСТ 30629-99 рекомендует с этой целью использовать ультразвуковой прибор УК-15П или другие ультразвуковые импульсные приборы. Такой метод, однако, пригоден для обнаружения лишь весьма крупных трещин. Микротрещиноватость же, согласно этому ГОСТу, определяется петрографическим анализом, т.е. визуально.

Стандартные испытания на прочность также не вполне достоверны и надежны, поскольку высокая хрупкость пород приводит к большим концентрациям напряжений вокруг неровностей поверхности и у пуансонов сжимающего пресса. Причиной появления напряжений может быть также несимметричная нагрузка и непараллельность граней, перпендикулярных приложенному сжатию. Более достоверными можно считать испытания на прочность при чистом изгибе, так как при этом методе испытаний в большей мере устраняется концентрация напряжений, однако и здесь результаты значительно зависят от качества обработки поверхностей образца и от присутствия трещин.

Что же касается контроля трещиноватости ультразвуковым теневым методом, то результаты такого контроля дают весьма большую погрешность. Микротрещиноватость же, как и пористость материала, ультразвуковым теневым методом определить вообще невозможно. Пористость, согласно ГОСТу, определяют на основании предварительно установленных значений истинной и средней плотности материала, а плотность определяют пикнометрическим способом, допустимая точность которого составляет 2 % [3], хотя реальная точность значительно меньше. Более точным, но и гораздо более трудоемким методом является метод гидростатического взвешивания, который применяется для более плотных материалов, пористость которых менее 3 %.

При открытой пористости ее значение близко к значениям истинной пористости. Вопрос об определении пористости подробно рассмотрен в целом ряде исследований [3-5, 8] и др. При закрытых порах разница между указанными видами пористости может быть весьма значительной.

Реальные методы оценки пористости не позволяют разделить пористость и микротрещиноватость, можно лишь оценить соотношение полой и сплошной фаз материала. Микротрещиноватость оценивается лишь при помощи петрографических исследований.

Микротрещиноватость в большей степени, нежели пористость, влияет на упругие свойства материала, на зависимость упругих свойств от внешних и внутренних напряжений, на такие важные эксплуатационные параметры, как водопоглощение, водопроницаемость, прочность, истираемость, морозостойкость, сохранность и ремонтопригодность.

Для микротрещин не выполняется предпосылка о малости изменения границ тела при нагружении, поэтому задача о равновесии тела с трещинами нелинейна [11].

Рост трещин начинается от дефектов, уже существующих в материале. При этом образование трещин сопровождается выде-

лением части упругой энергии, запасенной телом, и тем большей, чем больше размер трещины.

Пористость и микротрещиноватость сильно зависят от сжатия материала, влияя, таким образом, на модули упругости высших порядков и на внутреннее трение. В литературе эти зависимости описаны достаточно хорошо. Весьма обширные данные по зависимостям упругих констант от одноосного и гидростатического сжатия для различных горных пород приведены в работах [2, 10]. Значительный вклад в исследование этих зависимостей был сделан В.М.Меркуловой и В.М.Цаплевым [6, 9].

В работе [10] приведены результаты измерений зависимости дефекта модуля Юнга (его относительного изменения) при одноосном сжатии для гранита месторождения Куинси, Массачусетс. При одноосном сжатии до 8 МПа дефект модуля Юнга достигает порядка 140 %, при этом отмечалась сильная нелинейность и ползучесть. Столь значительные изменения модуля Юнга происходят в материалах, обладающих значительной пористостью и (или) микротрещиноватостью, и объясняются сжатием микротрещин при деформировании материала. Одновременно происходит уменьшение внутреннего трения, т.е. потерь упругой энергии на границах микротрещин [7].

Данные, приведенные выше, получены в результате статических или динамических измерений. Однако при динамических измерениях сильно влияет демпфирующее действие сжимающего пресса. В таких условиях точность полученных данных чрезвычайно низка и можно говорить лишь о тенденции в изменении параметра. Поэтому выбор в качестве основных информативных признаков контроля качества дефекта модуля Юнга и внутреннего трения оправдан, однако при условии применения достаточно точного ультразвукового метода измерения этих величин. Такой метод основан на резонансном ультразвуковом измерении скорости упругих колебаний и внутреннего трения образца, подверженного одноосному сжатию. В качестве исследуемых материалов были выбраны облицовочные горные

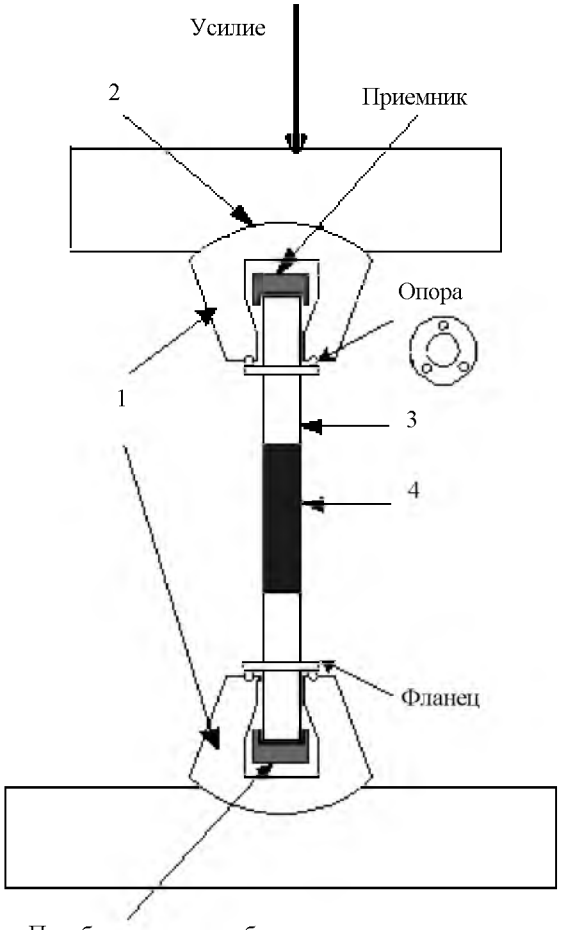


Рис.1. Схема резонансного ультразвукового измерения скорости

1 – опорные стаканы, 2 – сферические шарниры для выравнивания возможной несоосности, 3 – стальные полуволновые пуансоны, 4 – образец

породы, добываемые на месторождении Ловчорр (г.Кировск Мурманской обл.): хибинит, габбро, гранат-амфиболовый гнейс (гранулит), гранит и доломит.

Метод резонансного ультразвукового измерения скорости упругих колебаний и внутреннего трения образца, подверженного одноосному сжатию, был разработан одним из авторов настоящей работы и впервые применен для исследования пьезокерамических материалов [12]. Схема установки показана на рис.1. Не вдаваясь в подробное описание метода, отметим лишь, что он представляет собой модификацию многокомпонентного нагруженного составного вибратора с малыми потерями в месте закрепления.

Параметр	Хибинит	Габбро	Гранулит	Гранит	Доломит	Кварцит	Кварц
$v \cdot 10^3$, м/с	4,49	6,40	6,92	4,80	5,59	5,54	5,93
Q^{-1}	0,0088	0,0041	0,0074	0,0062	0,011	0,0025	< 0,0001
Q	116	243	135	161	91	400	> 10000
$E \cdot 10^{10}$, Па	5,359	12,6	15,0	6,08	8,38	8,10	7,74
$\rho \cdot 10^3$, кг/м^3	2,7	3,10	3,13	2,64	2,73	2,64	2,20
Поры, %	0,70	0,46	0,62	0,56	0,88	0,35	0
Коэффициент Пуассона	0,29	0,25	0,29	0,25	0,33	0,09	0,16

Примечание. v – скорость звука; Q^{-1} – внутреннее трение; Q – механическая добротность; E – модуль Юнга; ρ – плотность.

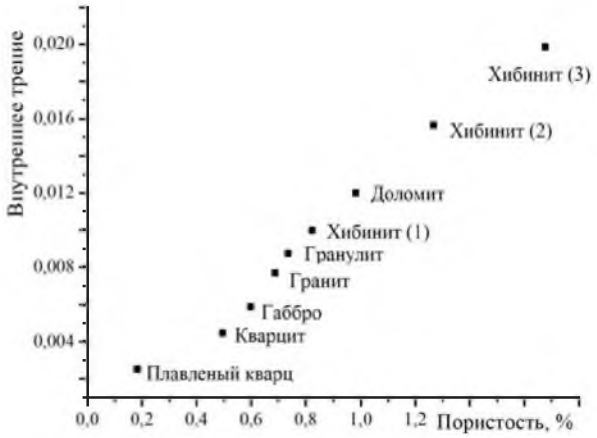


Рис.2. Зависимость коэффициента внутреннего трения от пористости



Рис.3. Зависимости дефекта модуля Юнга от пористости для различных пород

Для исследований были выбраны образцы из различных горизонтов отработки с различной степенью микротрещиноватости. Степень микротрещиноватости определялась предварительно при помощи петрографического анализа. Перед измерениями в режиме напряженного состояния были исследованы контрольные образцы при помощи двухкомпонентного составного вибратора, в котором в качестве эталонного стержня служил пьезокерамический стержень [13].

Для выявления степени зависимости внутреннего трения от пористости и микротрещиноватости были исследованы другие горные породы: габбро, гранат-амфиболовый гнейс (гранулит), гранит, доломит, кварцит. Кроме того, для сравнения исследовались образцы из плавленого кварца, обладающего нулевой пористостью и весьма малыми потерями на внутреннее трение. Результаты представлены в таблице.

Полученные результаты иллюстрируются зависимостью коэффициента внутреннего трения от пористости, показанной на рис.2. Следует отметить, что представленный график имеет качественный характер и проявляет скорее корреляционную, нежели функциональную зависимость. На упругие потери в материале влияет множество факторов. Тем не менее, можно отметить существенный и монотонный рост коэффициента внутреннего трения с увеличением пористости.

Здесь, правда, следует отметить, что на данном этапе исследований затруднительно разделить факторы пористости и микротрещиноватости, поскольку, как уже упоминалось, методика оценки пористости по ГОСТ 30629-99 не дает такой возможности. Пикнометрический метод так же, как и метод гидростатического взвешивания, устанавливает относительную величину пустой фазы в

материале. К пустой фазе в равной степени относятся как поры, так и микротрещины.

Точность измерений как пористости, так и коэффициента внутреннего трения весьма невелика. Точность измерения пористости пикнометрическим методом равна примерно 0,02, а методом гидростатического взвешивания 0,001. Однако средний разброс для различных образцов достигает 90 %. Точность измерения коэффициента внутреннего трения составляет 0,04-0,05.

Значительно большую точность могли бы дать измерения модуля Юнга ультразвуковым методом, однако модуль Юнга в значительной степени определяется минералогическим составом породы. Поэтому сравнивать можно только относительные изменения этой величины под действием внешнего фактора, т.е. напряжения сжатия, дефект модуля Юнга. На рис.3 представлены зависимости дефекта модуля Юнга при одинаковом сжатии 100 МПа.

Дефект модуля Юнга определялся для образцов различных пород, свойства которых приведены в таблице. Следует отметить, что процесс изменения модуля Юнга сопровождается весьма значительной ползучестью, т.е. имеет место последействие, которое продолжается достаточно долго.

Детальный анализ всех возможных механизмов физических процессов, которые могут иметь место в пористых и микротрещиноватых поликристаллических материалах, выходит за рамки настоящей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Беликов Б.П.* Облицовочный камень и его свойства / Б.П.Беликов, В.П.Петров. М.: Наука, 1977.

2. *Беликов Б.П.* Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород / Б.П.Беликов, К.С.Александров, Т.В.Рыжова. М.: Наука, 1970.

3. *Залесский Б.В.* Физико-механические исследования и опыт определения долговечности главнейших типов облицовочных камней из месторождений СССР / Б.В.Залесский, Б.П.Беликов // Труды ИГН. 1948. Вып.89.

4. *Кинд В.А.* Строительные материалы / В.А.Кинд, С.Д.Окороков. М.: Госстройиздат, 1934.

5. *Ломтадзе В.Д.* Методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород. М.: Недра, 1972.

6. *Меркулова В.М.* Изменение скоростей и внутреннего трения при продольных и крутильных колебаниях под нагрузкой в среде с микротрещинами / В.М.Меркулова, В.М.Цаплев // Прикладная акустика. Таганрог: Изд-во ТРТИ, 1973. (Труды ТРТИ. Т.5, вып.34).

7. *Меркулова И.М.* Влияние микротрещин на акустические параметры среды // Дефектоскопия. 1972. № 5.

8. *Энгельгарт В.* Поровое пространство осадочных пород. М.: Недра, 1964.

9. *Цаплев В.М.* Нелинейные свойства и ползучесть пьезокерамики. СПб: Изд-во СЗТУ, 2003.

10. *Birch Fr.* (*ed*) Handbook of Physical Constants / Fr.Birch, J.F.Schairer, H.Cecil Spicer. N.Y. 1942.

11. *Griffith A.* The phenomena of rupture and flow in solids // Phil. Trans. Roy. Soc. 1921. Vol.221. Ser.A.

12. *Tsaplev V.M.* Studies of Elastic and Unelastic Properties of Ferroelectrics under High Uniaxial Stress // International Journal of Acoustics and Vibration. 1997. Vol.2. N 4.

13. *Tsaplev V.M.* Multicomponent Complex Vibrator with the Active Feedback Control for Nondestructive Testing of Materials / V.M.Tsaplev, R.Jvanyuk // The Ninth International Congress on Sound and Vibration. 8-11 July, 2002. Orlando, Florida, USA.

REFERENCES

1. *Belikov P.B., Petrov V.P.* Facing stone and its properties. Moscow: Nauka, 1977.

2. *Belikov P.B., Aleksandrov K.S., Ryjova T.V.* Elastic properties of rockforming minerals and rocks. Moscow: Nauka, 1970.

3. *Zalessky B.V., Belikov B.P.* Physical-mechanical studies and expert definition of life duration of the main types of facing stones from the main deposits of the USSR // Proceedings of IGN. 1948. Is.89.

4. *Kind V.A., Okorokov S.D.* Building materials. Moscow: Gosstroyizdat, 1934.

5. *Lomtadze V.D.* Methods of laboratory studies of physical-mechanical properties of rocks. Moscow: Nedra, 1972.

6. *Merkulova V.M., Tsaplev V.M.* Changes of sound velocities and internal friction at longitudinal and torsional vibrations under stress in microcracked media // Applied Acoustics. Taganrog: Publ. house TRTI, 1973 (Proceedings of TRTI. Vol.5, iss.34).

7. *Merkulova V.M.* Influence of microcracks on the acoustical properties of media // Defectoscopia. 1972. N 5.

8. *Engelgart V.* Pore space of sedimentary rocks. Moscow: Nedra, 1964.

9. *Tsaplev V.M.* Nonlinear Properties and Creep in Piezoceramics. Saint Petersburg: Publ. house of North-West State Technical University, 2003.

10. *Birch Fr.* (*ed*), *Schairer J.F., Cecil Spicer H.* Handbook of Physical Constants. N.Y. 1942.

11. *Griffith A.* The phenomena of rupture and flow in solids // Phil. Trans. Roy. Soc. 1921. Vol.221. Ser.A.

12. *Tsaplev V.M.* Studies of Elastic and Unelastic Properties of Ferroelectrics under High Uniaxial Stress // International Journal of Acoustics and Vibration. 1997. Vol.2. N 4.

13. *Tsaplev V.M., Jvanyuk R.* Multicomponent Complex Vibrator with the Active Feedback Control for Nondestructive Testing of Materials // The Ninth International Congress on Sound and Vibration. 8-11 July, 2002. Orlando, Florida, USA.