

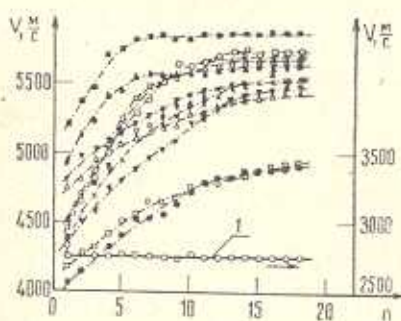
В. П. ЕПИФАНОВ, И. Ю. ВОРОНИНА

### КИНЕТИКА РАЗРУШЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГРАНИТА ПРИ ОСЕВОМ СЖАТИИ

Получена экспериментальная зависимость скорости распространения ультразвуковых волн от величины осевой нагрузки. Оценен объем материала, в котором возникает дефект, и прослежена кинетика процесса разрушения гранита.

Общезвестно применение акустического метода исследования с целью получения информации о физико-механических свойствах вещества [1, 2] и его структурных особенностях [3, 4]. Естественно ожидать, что этот метод позволит составить более полную картину структурных изменений в граните при осевом сжатии.

Для получения воспроизводимых данных отбирались образцы с близкими по акустическим свойствам характеристиками. С этой целью использовалась следующая методика. Образцы насыщались маслом и по мере насыщения определялась скорость ультразвука, затем масло десорбировалось, а образцы сушились до постоянного веса. Изменение скорости ультразвука (фиг. 1) индивидуально для каждого образца, что может быть связано с различным расположением и величиной микротрещин. По сорбционным кривым можно получить представление о характере трещиноватости образца. Предполагалось, что одинаковым образцам должны соответствовать близкие по характеру сорбционные кривые.



Фиг. 1. Зависимость скорости распространения продольной акустической волн в граните  $v_1$ ,  $\text{мс}^{-1}$  (линия 1 — в оргстекле) от времени  $n$ , сутки

В работе использовались цилиндрические образцы мелкозернистого карельского гранита [5] диаметром 30 мм и высотой около 60 мм. Образцы имели преимущественную ориентацию микротрещин вдоль оси. Это обстоятельство позволило использовать различия в скоростях распространения звука в безграничной  $v_1$  и ограниченной  $v_2$  среде

$$v_1 = [E(1 - \nu)/\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)]^{1/2}; \quad v_2 = (E/\rho)^{1/2}$$

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона,  $\rho$  — плотность,  $E$  — модуль Юнга.

Выбирались такие соотношения диаметра излучателя и образца, для которых возможен переход от одного типа волн к другому при заполнении трещины более плотной средой.

Перед измерениями на торцевую поверхность образцов наносилось приблизительно одинаковое количество масла типа МВП. Для образцов гранита скорость продольной волны возрастала при заполнении пустот впитавшимся маслом. Для сравнения измерялась продольная скорость в образце полиметил-метакрилата. Полиметил-метакрилат не содержал трещин и не впитывал масла, поэтому для него скорость ультразвука оставалась постоянной.

Для некоторых образцов насыщение маслом достигалось помещением в масляную ванну при температуре 110°C. Десорбция для всех образцов, содержащих масло, осуществлялась в токе насыщенного водяного пара. Зная массу впитавшегося масла, его плотность и объем образца, можно определить суммарный объем пустот. Расчетная величина пористости составляет около 1%.

Дополнительную информацию о расположении трещины можно получить из сопоставления величин скорости, направленной вдоль  $v_1$  и поперек  $v_2$  образца (табл. 1). В большинстве случаев  $v_1 > v_2$ . При осевом вращении образца значение скорости  $v_2$  и амплитуда сигнала меняются. Эти факты можно рассматривать как подтверждение анизотропии материала, связанной с преимущественной ориентацией трещин вдоль образца.

Таблица 1

№	$v_1, \text{ мс}^{-1}$	$v_2, \text{ мс}^{-1}$
1	5620	5110—5400
2	5700	5400—5490
3	5650	5600—5980
4	5840	5290—5810
5	5680	5490—5550
6	5540	5290—5370
7	5920	5990 ± 20
8	5160	5100 ± 20

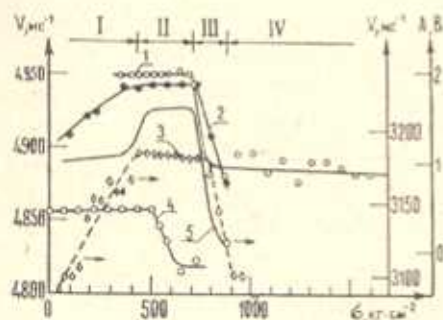
Величина скорости продольной акустической волны, направленной вдоль  $v_1, \text{ мс}^{-1}$  и перпендикулярно  $v_2, \text{ мс}^{-1}$  оси произвольно выбранных образцов гранита. Для  $v_2$  приведены min и max значения, полученные при вращении образца ( $\Delta v = \pm 10 \text{ мс}^{-1}$ ).

Для нахождения зависимости скорости распространения  $v$  акустической волны от величины осевой нагрузки  $\sigma$  были опробованы два варианта наблюдения. В первом случае волна пропусклась вдоль оси образца, во втором — перпендикулярно ей. Измерения выполнялись по традиционной методике [6]. Образцы гранита, использовавшиеся для нахождения  $v \approx f(\sigma)$ , не содержали масла. В качестве акустической смазки использовался научук СКН-18, а в отдельных случаях — вазелин. В полученной экспериментальной зависимости (фиг. 2) можно выделить четыре харак-

терные области изменения скорости от нагрузки. Это области возрастания (1), постоянства (2), уменьшения (3) и нестабильных значений (4) скорости звуковой волны в образце гранита при увеличении нагрузки.

Увеличение скорости с возрастанием нагрузки (линии 2, 3) и участок, почти параллельный оси абсцисс, наблюдались и ранее [7].

Сначала при увеличении осевого сжатия происходит сокращение объема пустот и улучшается контакт отдельных зерен гранита друг с другом, что приводит к возрастанию модуля  $E = d\sigma/d\varepsilon$ , а также к увеличению скорости и уменьшению затухания акустического сигнала на этом участке кривой. Такое объяснение качественно правильно предсказывает изменение величины скорости, что подтверждается сопоставлением расчетных и экспериментальных значений продольной  $v_l$  и сдвиговой  $v_t$  скорости.



Фиг. 2. Зависимость скорости продольной  $v_l$ ,  $\text{мс}^{-1}$  (линии 1, 2, 4) и сдвиговой  $v_t$ ,  $\text{мс}^{-1}$  (3) волн от величины нормального напряжения  $\sigma$ ,  $\text{кг см}^{-2}$ . 1, 4 — звуковой луч направлен вдоль оси; 2, 3, 5 — поперек образца. 5 — изменение амплитуды  $A, B$ -вольт прошедшего сигнала продольной волны от  $\sigma$ ,  $\text{кг см}^{-2}$ ,  $f = 1.25$  МГц

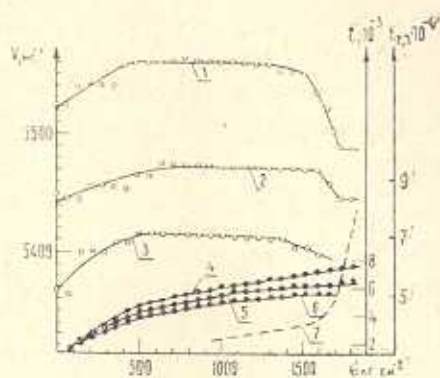
Контроль скорости звука для луча, направленного вдоль оси образца (линии 1, 4, фиг. 2), выполнялся в разгруженном состоянии. В этих условиях зависимость скорости от величины осевого сжатия не наблюдалась вплоть до значительных напряжений. Этот факт свидетельствует об обратном характере изменения свойств в первой области.

Дальнейшее увеличение нагрузки сопровождается резким уменьшением скорости (третья область). Она может заканчиваться «взрывом», то есть внезапным разрушением образца, при этом большая часть образца превращалась из монолита в мелкую щебенку (кривая 2, фиг. 2). Возможен, однако, переход в четвертую область (кривые 1, 3, 4, фиг. 2), для которой характерны нестабильные значения скорости и потрескивание образца. Заканчивается эта область разрушением.

Уменьшение скорости (область 3) при увеличении осевого сжатия может быть связано с увеличением числа дефектов и их развитием [8, 9]. В пользу этого предположения свидетельствует экспериментальный факт увеличения коэффициента затухания. Известна работа [10], где найдена зависимость скорости продольной волны от величины внутреннего дефекта, то есть поры. Есть основания предполагать, что и в нашем случае уменьшение скорости от величины осевого сжатия связано с возникновением и развитием дефектов. Поскольку микротрещины ориентируются параллельно оси наибольшего сжатия и раскрываются в направлении наименьшего сжатия, то увеличение объема при образовании трещин [11] должно вносить существенный вклад в  $\varepsilon_{2,3}$ .

Сопоставление скорости продольной волны и относительного сжатия от величины приложенной нагрузки приведено на фиг. 3. Кривые 1, 4; 2, 5; 3, 6, 7 соответствуют трем последним циклам нагружения образца перед разрушением. Прослеживается корреляция между относительным сжатием и скоростью распространения продольной волны  $v = f(\sigma)$ .

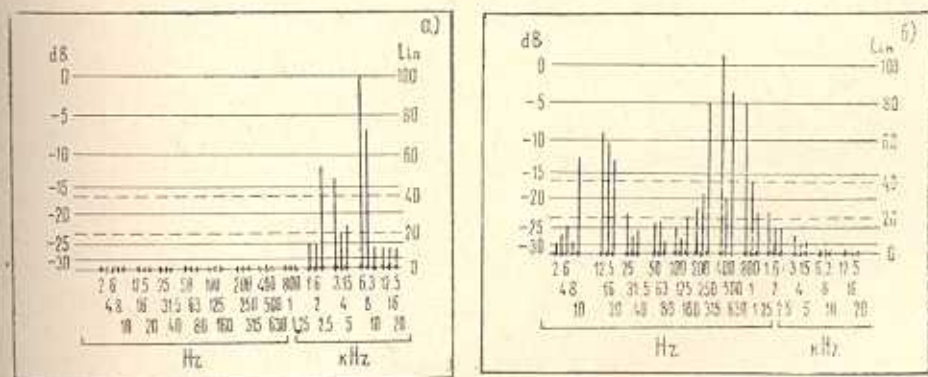
Фиг. 3. Изменение скорости  $v_l$ ,  $\text{мс}^{-1}$  продольной волны (линии 1, 2, 3) и относительной продольной деформации  $\varepsilon_1$  (линии 4, 5, 6),  $\varepsilon_{2,3}$  (линия 7) от величины нормального напряжения  $\sigma$ ,  $\text{кг см}^{-2}$ .



Близкая к прямолинейной зависимость  $v$  от  $\sigma$  при значительных  $\sigma$  дает  $d\sigma/dv = \text{const}$ , то есть участок, параллельный оси абсцисс на кривой  $v \approx f(\sigma)$ . Можно отметить, что скорость звука чувствительна к изменению состояния образца при сжатии и к остаточным структурным изменениям при циклических нагружениях.

По данным акустических измерений и из зависимости  $\varepsilon_{1,2} = f(\sigma)$  можно рассчитать модуль Юнга и коэффициент Пуассона. Сравнение значений для любого произвольно выбранного образца дает приемлемое совпадение, например,  $E = 6.6 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ ,  $\mu = 0.28$ .

Как уже отмечалось, непосредственно перед разрушением в материале образца генерируются акустические сигналы. Спектрограмма такого импульса приведена на фиг. 4а. В зависимости от условий нагружения и



Фиг. 4. Спектрограмма характерного треска: а — предшествующего разрушению гранита, б — в момент разрушения.

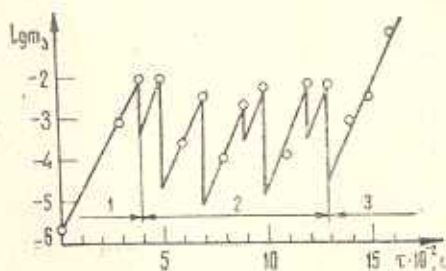
предыстории образца можно наблюдать несколько таких сигналов длительностью 0,04—0,06 сек частотой 6—8  $\text{кГц}$ . Видимых изменений образ-

ца при этом не наблюдается. Аналогичные импульсы при нагружении материала наблюдались и в других материалах [12, 13].

Если генерирование акустических импульсов средой считать подобным излучению элементарного осциллятора [14] с частотой  $f = 1/2\pi\sqrt{a/m}$ , где  $a$  — коэффициент упругости,  $m$  — масса осциллятора, то можно оценить характерный размер среды, в котором происходит процесс элементарного разрушения.

Полагая для упрощения, что закон Гука оправдывается вплоть до разрушения образца  $\sigma = a \cdot \Delta l$ , где  $\Delta l$  — смещение ( $\Delta l = r_- - r_0$ ) и принимая для ионной решетки  $r_0 = 2\text{Å}$ ,  $r_- = 10\text{Å}$ ,  $\sigma = 6 \cdot 10^{-5}$  дин на связь, определим массу и характерный объем гранита, в котором генерируются сигналы акустической эмиссии. Соответствующие величины будут иметь значение  $m_b = 5 \cdot 10^{-7}$  г и  $V_b = 6 \cdot 10^{-4}$  см<sup>3</sup>.

За отдельными сигналами акустической эмиссии следует лавиноподобный процесс разрушения материала продолжительностью 0,08—0,18 сек. Частота акустических сигналов уменьшается от 6—8 кГц до десятков герц к концу разрушения. Используя модельные представления гармонического осциллятора, можно (фиг. 5) проследить механизм процесса разрушения гранита. Возникшая трещина растет до того момента, когда ее развитие будет ограничено другой трещиной. Однако процесс разрушения на этом не локализуется. Видимо, в плоскости будущего скола развиваются сразу несколько трещин (в пользу этого предположения свидетельствует наличие в спектрограмме по крайней мере одновременно двух импульсов: высокой и низкой частот (фиг. 4б)) и большинство из них заканчивает свой рост на имеющихся в образце микротрещинах. Этот процесс (участок 2) продолжается до тех пор, пока в сечении будущего разрушения не накопится достаточное количество дефектов и не станет возможным развитие магистральной макротрещины (участок 3, фиг. 5).



Фиг. 5. Изменение эффективной массы гранита  $m_e$  г в объеме разрушения от времени  $\tau$ , с.

Таким образом, исследования зависимостей  $\alpha$ ,  $\nu = f(\sigma)$  позволяют получить информацию о структурных особенностях материала (наличии трещин, пор, их преимущественной ориентации). Это направление можно определить как активный акустический контроль. Во-вторых, анализ спектрограмм сигналов акустической эмиссии до и в процессе разрушения интересен для определения прочностных свойств и кинетики разрушения.

Практическую ценность оба направления могут иметь для прогнозирования возникновения критической ситуации в напряженных конструкциях.

Институт проблем механики  
АН СССР

Поступила 5 XI 1979

Վ. Պ. ԵՊԻՖԱՆՈՎ, Ի. ՅՈՒ ՎՈՐՈՆԻՆԱ

ՔԱՅՔԱՅՄԱՆ ԿԻՆԵՏԻԿԱՆ ԵՎ ԳՐԱՆԻՏԻ ԱԿՈՒՍՏԻԿԱԿԱՆ  
ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՓՈՓՈԽՈՒՄԸ ԱՌԱՆՑՔԱՅԻՆ ՍԵՂՎՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ

Ա մ փ ո փ ու մ

Բերվում են մանրահատիկավոր զրանիտի նմուշների ակուստիկական պարամետրերի կապակցությունների փորձարարական ուսումնասիրության արդյունքները կախված առանցքային սեղմման մեծությունից:

Թույլ մածուցիկությամբ էնդուլի սորբցիայի և դիսորբցիայի ակուստիկական իդոթերմերի ավյալներով զնահատվել է ծակոսկինությունը և նմուշների ճեղքերի յուրահատուկ ցանցը:

Ակուստիկական էմիսիայի նշանների սպեկտրոգրամմաներով զնահատվել է նյութի ծավալը, որում առաջանում է թերություն և նշմարվել է զրանիտի րայրայման ընթացքի կինետիկան:

KINETICS OF FRACTURE AND CHANGE IN ACOUSTIC  
PARAMETERS OF GRANITE UNDER AXIAL COMPRESSION

V. P. EPIFANOV, I. Y. VORONINA

S u m m a r y

The acoustic parameters dependence on the value of compression is investigated on the basis of uniaxial compression tests of fine-grained granite specimens.

Porosity of samples and their characteristic network of cracks are evaluated from the data of acoustic isotherms of sorption and desorption of a liquid with low viscosity.

The kinetics of fracture is traced and the volume of the material in which the defects arise is estimated from the acoustic emission spectrograms.

ЛИТЕРАТУРА

1. Matsushita S. Compressional and shear wave velocities of volcanic rocks and glasses to 900°C at 20 kbar. "High-Pressure Sci and Technol. Proc. 6-th AIRAPT Conf., Boulder, Colo, 1977, Vol. 2", New-York-London, 1979, 216—222.

2. *Николаевский В. Н., Лившиц А. Д., Сизов И. А.* Механические свойства горных пород. Деформация и разрушение. Сборник серии «Итоги науки и техники ВИНТИ», «Механика деформируемого твердого тела», т. 11, М., 1978, стр. 123—250.
3. *Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чук Б.* Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М., «Мир», 1972, стр. 149—180.
4. *Рикигакэ Т.* Предсказание землетрясений. М., «Мир», 1979, стр. 272—278.
5. *Справочник (кадастр) физических свойств горных пород.* Под ред. акад. Н. В. Мельникова и др., М., «Недра», 1975.
6. *Мак-Скимин Г.* Физическая акустика. Под ред. У. Мэзона, часть А, т. 1, «Мир», 1966, стр. 357—361.
7. *Matsushima S.* Variation of the elastic wave velocities of rocks in the process of deformation and fracture under high pressure. Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., 1960, 32, 2.
8. *Scholz C. H.* Experimental study of the fracturing process in brittle rock. J. Geophys. Res., 1968, 73, 1447.
9. *Brace W. F.* Current laboratory studies pertaining to earthquake prediction. Tectonophysics, 1968, 6, 75.
10. *Ranachowski J.* Propagation of ultrasonic waves in porous ceramics. Ultrasonics, 1975, Vol. 13, 5, 203—207.
11. *Brace W. F., Paulding B. W., Scholz C. H.* Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. J. Geophys. Res., 1966, 71, 3939.
12. *Mogi K.* Study of the elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relation to earthquake phenomena. Bull. Earthquake Res. I., Univ. Tokyo, 1962, 40, 125.
13. *Byerlee J. D.* Frictional characteristics of granite under high confining pressure. J. Geophys. Res., 1967, 72, 3639.
14. *Кобеко П. П.* Аморфные вещества. АН СССР, М.—Л., 1952, стр. 8—9, 212—232.