

ЛИТЕРАТУРА

1. K ê T. S. Новые возможные пути повышения прочности металлов. Кехие tongbao, Scientia, 1960, No. 18.
2. K ê T. S. and W a n Y. K. Growth and strength of metal whiskers containing impurities. Scientia sinica, 1961, vol. 10, No. 3.
3. K ê T. S., C h u a n g Y. H. and W a n Y. K. Metallographic observations and hardness measurements on mixed metal whiskers. Scientia sinica, 1961, vol. 10, No. 3.
4. C h o u N. P., K ê T. S. Strength and deformation peculiarities of binary metal whiskers. Acta phys. sinica, 1963, vol. 19, No. 12.
5. О д и н г И. А., К о п ь е в И. М. Структура и прочностные свойства усов смеси меди и железа. Исследования по высокопрочным сплавам и нитевидным кристаллам. Изд-во АН СССР, 1963.
6. К о с т ь о в В. Г., З и л и н г К. К. и С е р е б р я к о в А. В. Прочностные свойства металлических нитевидных кристаллов с примесями, Физика твердого тела, 1963, т. 5, No. 11.
7. B r e w e r L e o. The fusion and vaporisation data of the halides. The chemistry and metallurgy of miscellaneous materials. McGraw-Hill book company, New York — Toronto — London, 1950.
8. B r e w e r L e o, B r o m l e y L. A., G i l l e s P. W. and L o f g r e n N. L. The thermodynamic properties of the halides, *ibid*.
9. Г л у ш к о В. П. (ред.) Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Изд-во АН СССР, 1962, т. 1, 2.
10. К н а к к е О. и С т р а н с к и й И. Н. Механизм испарения. Успехи физ. металлов. Металлургия, 1960, т. 3.
11. B r e n n e r S. S. The growth of whiskers by the reduction of metal salts. Acta metallurgica, 1956, vol. 4, p. 62.
12. K e l l y A. and N i c h o l s o n R. B. Precipitation hardening. Progress in material science, Pergamon press, New York, 1963, vol. 10.
13. N e w k i r k J. B. Mechanism of precipitation in a Cu-2,5 pct Fe alloy. J. of metals, 1957, vol. 9, No. 10, sect. 2.
14. Ч е р н о в А. А. Слоисто-спиральный рост кристаллов. Успехи физ. наук, 1961, т. 73, № 2.
15. M a s k l i e t C. A. Diffusion of iron, cobalt and nickel in single crystals of pure copper. Phys. Rev., 1958, vol. 109, No. 6.
16. В о л А. Е. Строение и свойства двойных металлических систем. Физматгиз, 1962, т. 2.

**О ХАРАКТЕРЕ ЗАТУХАНИЯ УПРУГИХ ВОЛН В ГОРНЫХ ПОРОДАХ
В ОБЛАСТИ КОЛЕБАНИЙ МАЛОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ**

В. С. Ямщиков

(Москва)

Теоретическими исследованиями установлено [1, 2], что в случаях, когда деформации, происходящие в твердом теле при воздействии упругих волн, малы, то зависимость между компонентами тензора напряжений и компонентами тензора деформации можно считать линейной, т. е. в области колебаний малых амплитуд можно в разложении упругой энергии по степеням тензора деформации ограничиться членами второго порядка. Особенностью этого приближения является отсутствие взаимодействия между продольными и поперечными волнами. Если же деформации имеют большее значение, то связь между компонентами тензора деформации и тензора напряжений становится нелинейной, и в разложении упругой энергии нужно учитывать кубические члены. В этом случае упругие волны относят к волнам конечной амплитуды. Следствием из нелинейной связи между компонентами тензоров напряжения и деформации является необходимость учета взаимодействия между продольными и поперечными волнами. При рассмотрении этих волн в твердых телах нелинейные эффекты обнаружены экспериментально [3].

Так как в практике применения ультразвука как средства исследования материалов могут быть использованы как волны малых, так и некоторая часть волн конечных амплитуд, т. е. упругие колебания малой интенсивности, то в связи с этим большой интерес представляет выявление границы между областью существования волн малых и конечных амплитуд. За показатель разграничения этих волн при распространении их в горных породах было взято изменение в характере затухания упругих волн в зависимости от интенсивности.

Экспериментальные исследования проводились на установке, схема которой приведена на фиг. 1 (где 1 — стабилизатор, 2 — ультразвуковой генератор, 3 — излучатель, 4 — приемник, 5 — осциллограф, 6 — образец, 7 — ванна).

Акустический узел установки (излучатель — образец — приемник) помещался в специальную ванну, вода в которой служила контактным слоем, позволяющим поддерживать однородную энергетическую связь между пьезопреобразователями и образцом. Толщина контактного слоя составляла при возбуждении продольных волн доли мм, а при возбуждении поперечных волн — около 1.5–2 см.

Излучателем служила кварцевая пластинка с частотой собственных колебаний 880 кГц. Максимальная мощность P составляла около 8.5–9 Вт при активной площади излучателя 4 см². Мощность регулировалась равномерно-ступенчато. Опыты велись при непрерывном режиме излучения.

Величина излучаемой мощности проверялась на механическом измерителе мощности ультразвукового излучения. Погрешность измерения мощности составляла ± 0.25 Вт.

Эксперимент состоял в том, что при изменении интенсивности излучения I Вт/см² кварцевым пьезопреобразователем на известную величину на экране электронно-лучевой трубки осциллографа фиксировалась амплитуда прошедшей через образец исследуемой горной породы ультразвуковой волны. Так как амплитудная характеристика приемного тракта установки была линейна в данном диапазоне измерений, то оценка влияния интенсивности на затухание ультразвука производилась по изменению амплитуды волны, прошедшей через образец, которая фиксировалась на осциллографе. Опыты с каждым образцом горной породы проводились по несколько раз.

Для сравнения полученных результатов, независимо от поглощающих свойств исследуемого типа горных пород, введена относительная величина K_α , представляющая относительную амплитуду волны, прошедшей через образец, и равная отношению измеряемой амплитуды A при соответствующей интенсивности излучения к начальной амплитуде A_0 при интенсивности 0.23 Вт/см², т. е.

$$K_\alpha = A_i / A_0 \quad (1)$$

Экспериментально было исследовано изменение характера затухания продольных и поперечных волн в плотных горных породах (диабаз, перидотит) в зависимости от интенсивности в интервале от 0 до 2 Вт/см².

Ультразвуковые продольные волны создавались в образцах горных пород по методике прозвучивания. Для возбуждения «чистых» поперечных волн в образцах использовалось явление полного внутреннего отражения продольной волны от образца, что связано с поворотом последнего на некоторый критический угол относительно распространяющейся упругой волны. В нашем случае величина угла полного внутреннего отражения для продольной волны составляла: для перидотита — 15°, для диабаз — 18°.

$P, \text{ Вт}$	$I, \text{ Вт/см}^2$	Продольная	Поперечная	Продольная	Поперечная
		диабаз		перидотит	
0.9	0.23	1.00	1.00	1.00	1.00
1.9	0.47	1.18	1.37	1.25	1.47
2.6	0.65	1.32	1.62	1.45	1.88
3.1	0.78	1.48	1.87	1.65	2.12
3.6	0.90	1.58	2.00	1.85	2.35
4.5	1.12	1.65	2.25	1.95	2.60
5.5	1.37	1.72	2.50	2.00	2.90
6.4	1.60	1.75	2.75	2.05	3.12
7.2	1.8	1.79	3.00	2.07	3.22
8.6	2.15	1.81	3.15	2.09	3.56

Результаты экспериментов (значения K_α) приведены в таблице для продольной и поперечной волн.

На фиг. 2 приведена зависимость относительной амплитуды для продольной (1) и поперечной (2) ультразвуковых волн, прошедших образец горной породы, от интенсивности для перидотита. Из графика видно, что для продольных упругих волн при некоторой интенсивности излучения ($1-1.5 \text{ em} / \text{cm}^2$) обнаруживается нелинейная зависимость между интенсивностью и относительной амплитудой волны, прошедшей образец. В области колебаний с интенсивностью от 0 до $1.2-1.5 \text{ em} / \text{cm}^2$ наблюдается четко выраженная линейная зависимость изменения относительной амплитуды продольной волны от ее интенсивности. Отсюда можно заключить, что упругие волны, распространяющиеся с интенсивностью, соответствующей появлению нелинейных эффектов, а следовательно, и связанным с ними нелинейным характером затухания продольной волны от интенсивности, следует относить к волнам конечной амплитуды.

Граница появления нелинейной зависимости в характере затухания от интенсивности колебаний у различных горных пород не постоянна, что объясняется, по-видимому, различной плотностью последних, и заключена в интервале интенсивности от 1 до $1.6 \text{ em} / \text{cm}^2$. У более плотных пород нелинейные эффекты появляются раньше.

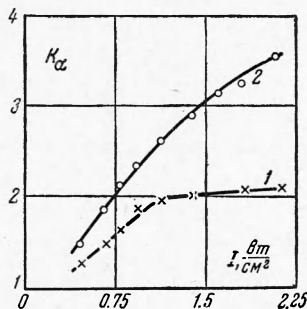
Для «чистой» поперечной упругой волны в данном диапазоне изменения интенсивности связь между относительной амплитудой волны и интенсивностью носит почти линейный характер. Незначительные отклонения от линейности связаны, вероятно, с анизотропией физических свойств исследуемых горных пород.

Полученные экспериментальные зависимости подтверждаются и объясняются теоретическими исследованиями, проведенными ранее при рассмотрении задачи о распространении упругих волн в однородной упругой среде [2].

Принято [1], что упругая энергия единицы объема деформированного тела под действием распространяющейся упругой волны конечной амплитуды с точностью до кубических членов равна

$$\varepsilon = \frac{\lambda + 2\mu}{2} J_1^2 - 2\mu J_2 + \frac{l + 2m}{3!} J_3^2 - 2m J_1 J_2 + n J_3 \quad (2)$$

Здесь λ и μ — константы Ламэ, l , m , n — некоторые постоянные коэффициенты ангармоничности, J_1 , J_2 , J_3 — инварианты тензора деформации, равные для случая распространения плоской упругой волны вдоль оси x



$$J_1 = u_{11}, \quad J_2 = u_{12}^2 - u_{13}^2, \quad J_3 = 0 \quad (u_{ik} \text{ — вектор смещения})$$

При этом, если волна продольная ($u_x \neq 0, u_y = u_z = 0$), то упругая энергия равна

$$\varepsilon = \frac{\lambda + 2\mu}{2} u_{11}^2 + \frac{l + 2m}{3} u_{11}^3 \quad (3)$$

Если же волна чисто сдвиговая ($u_x = 0, u_y \neq 0, u_z \neq 0$), то энергия равна

$$\varepsilon = 2\mu (u_{12}^2 + u_{13}^2) \quad (4)$$

Отсюда видно, что для продольной волны конечной амплитуды должны существовать нелинейные эффекты, а в чисто поперечной волне такие эффекты отсутствуют.

Эти положения полностью подтверждаются экспериментальными данными, полученными при распространении продольных и поперечных упругих волн малой интенсивности в горных породах.

Результаты исследования следует учитывать при изучении затухания звуковых и ультразвуковых волн в горных породах.

Поступила 3 VI 1964

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Механика сплошных сред. Гостехиздат, 1954.
2. Полякова А. Л. Нелинейные эффекты в твердых телах. Физика твердого тела, 1964, т. 6, № 1.
3. Крассильников В. А., Гедройц А. А. Искажение формы ультразвуковой волны конечной амплитуды в твердых телах. Вестн. Моск. ун-та, 1962, № 2.