

УДК 534.29+539.32

В.А. Мащенко*Одеська державна академія технічного регулювання та якості***ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛІВ ПРУЖНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ ТА ГЕТЕРОГЕННИХ МАТЕРІАЛІВ УЛЬТРАЗВУКОВИМ МЕТОДОМ**

В роботі розглянуто можливості іммерсійного ультразвукового методу вимірювання швидкостей поширення поздовжньої і поперечної хвиль у зразках конструкційних і гетерогенних матеріалів. За експериментальними значеннями густини та акустичних параметрів визначені модулі Юнга, модулі зсуву, модулі об'ємної деформації і коефіцієнти Пуассона різних типів конструкційних і гетерогенних матеріалів. Для отриманих значень проведено порівняльний аналіз із відповідними величинами при вимірюваннях механічними методами.

Ключові слова: ультразвуковий метод, поздовжня та поширення хвилі, швидкість поширення, коефіцієнт Пуассона, модуль Юнга, модуль зсуву, об'ємний модуль деформації.

В.А. Мащенко**ОПЕРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ И ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ**

В работе рассмотрено возможности иммерсионного ультразвукового метода измерений скоростей распространения продольной и поперечной волны в образцах конструкционных и гетерогенных материалов. На основании экспериментальных значений плотности и акустических параметров определены модули Юнга, модули сдвига, модули объемной деформации и коэффициенты Пуассона различных типов конструкционных и гетерогенных материалов. Для полученных значений проведен сравнительный анализ с соответствующими величинами при измерениях механическими методами.

Ключевые слова: ультразвуковой метод, продольная и поперечная волны, скорость распространения, коэффициент Пуассона, модуль Юнга, модуль сдвига, объемный модуль деформации.

V. Mashchenko**DETERMINATION OF ELASTICITY MODULES OF CONSTRUCTIONAL AND HETEROGENEOUS MATERIALS BY ULTRASONIC METHOD**

The article considers the possibilities of the immersion ultrasonic method of measuring the velocities of propagation of longitudinal and transverse waves in samples of structural and heterogeneous materials. According to the experimental values of density and acoustic parameters, Young's modules, shears modules, volumetric deformation modules and Poisson's ratio of various types of structural and heterogeneous materials are defined. For the obtained values a comparative analysis with the corresponding values at measurements by mechanical methods was carried out.

Key words: ultrasonic method, longitudinal and transverse waves, propagation velocity, Poisson's ratio, Young's module, shear module, volumetric deformation module.

Постановка проблеми. У сучасному приладобудуванні і гірничій механіці, при оцінці стійкості об'єктів геотехнічних систем, важливим фактором є визначення механічних властивостей конструкційних та гетерогенних матеріалів. Найбільш інформативними параметрами, які дозволяють оцінити механічні характеристики конструкційного або гетерогенного матеріалу як твердого тіла за співвідношеннями теорії пружності, є швидкості поширення ультразвукових (УЗ) коливань різного типу, зокрема поздовжніх (l) та поперечних (t) [1]. Ультразвукові методи давно займають ведучі позиції в арсеналі експериментаторів, які займаються визначенням пружних властивостей (модуль Юнга, модуль зсуву, модуль об'ємної деформації) різного типу матеріалів. Суть УЗ-методу полягає в тому, що елементарний об'єм твердого тіла періодично певним чином деформується і при цьому змінюються пружні характеристики матеріалу та втрати енергії. Отримані таким чином результати співставляються із фізичним процесами, що проходять у зразку.

Якщо у матеріалі зовнішнє джерело ультразвуку збуджує коливання, то вони не залишаються обмеженими біля центра виникнення, а створюють у середовищі пружні напруження, що у свою чергу, надають руху сусіднім структурним одиницям. Через малу амплітуду коливань при таких рухах компоненти тензора напруг і деформацій не виходять за межі закону Гука.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Для вимірювання швидкостей поширення ультразвукових коливань в зразках матеріалів використовується іммерсійний метод [2–4], що дозволяє визначити значення поздовжньої (v_l) та поперечної (v_t) УЗ-хвиль. В роботах [3–6] на основі експериментальних вимірювань v_l та v_t визначенні механічні характеристики окремих матеріалів.

Постановка завдань. Метою роботи було визначити практичний аспект застосування УЗ-методу при вимірюваннях швидкостей поширення поздовжньої та поперечної хвиль для визначення коефіцієнта Пуассона та модулів пружності ряду конструкційних та гетерогенних матеріалів.

Виклад основного матеріалу. Визначення швидкості поширення поздовжньої УЗ-хвилі базується на порівнянні результатів прямих вимірювань часів поширення зондуєчого імпульсу через імерсійну рідину при відсутності зразка (τ) та при наявності зразка (τ_l) між випромінювачем і приймачем сигналів. При відомій різниці між часовими інтервалами $\Delta\tau_l$ ($\Delta\tau_l = \tau - \tau_l$), значення v_l визначають із співвідношення:

$$v_l = \frac{v_p d}{d - \Delta\tau_l v_p}, \quad (1)$$

де v_p – швидкість поширення УЗ-хвилі у імерсійній рідині, d – товщина зразка матеріалу із строго паралельним поверхнями.

Вимірювання швидкості поперечної УЗ-хвилі базується на тому, що при падінні поздовжньої хвилі під деяким кутом (θ) на межу поділу рідина – тверде тіло в останньому в загальному випадку поширюються дві хвилі: поздовжня і поперечна. Метод обертової пластини дозволяє визначити критичний кут ($\theta_{кр.}$), при якому поздовжня хвиля трансформується у поверхневу, а у зразку поширюється тільки поперечна хвиля. Величину v_l в такому випадку розраховують за співвідношенням:

$$v_l = \frac{v_p}{\sqrt{\sin^2(\theta_{эд.}) + \left(\cos(\theta_{эд.}) - \frac{v_p \Delta\tau_l}{d}\right)^2}}, \quad (2)$$

де $\Delta\tau_l$ – різниця між часом проходження зондуєчого імпульсу при відсутності зразка та при наявності зразка (τ_l), розміщеного кутом $\theta_{кр.}$ до напрямку падіння.

Одним із основних параметрів матеріалу є коефіцієнт Пуассона (ν), який при відомих значеннях v_l та v_t визначається наступним чином [7]:

$$\nu = \frac{2 - \left(\frac{v_l}{v_t}\right)^2}{2 \left(1 - \left(\frac{v_l}{v_t}\right)^2\right)}. \quad (3)$$

Без врахування внутрішніх втрат енергії на проходження УЗ-хвиль через зразок матеріалу модуль Юнга (E), модуль зсуву (μ) та модуль об'ємної деформації (k) за співвідношеннями теорії пружності визначаються наступним чином [3, 7]:

$$E = \rho v_l^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu}; \quad (4)$$

$$\mu = \rho v_t^2; \quad (5)$$

$$k = E - \frac{4}{3}\mu, \quad (6)$$

де ρ – густина матеріалу.

Коли поперечні розміри елементарного об'єму твердого тіла, в якому поширюється поздовжня УЗ-хвиля, малі у порівнянні із довжиною хвилі величину E визначають за співвідношенням [1]:

$$E = \rho v_l^2. \quad (7)$$

У випадку, коли не можна знехтувати затуханням поздовжньої та поперечної УЗ-хвиль у зразку досліджуваного матеріалу, визначають комплексні модулі пружності. Дійсні та уявні частини комплексних модулів розраховують за наступними співвідношеннями [8]:

$$E' = \rho v_l^2 \frac{1 - \frac{\alpha_l^2 v_l^2}{\omega^2}}{\left(1 + \frac{\alpha_l^2 v_l^2}{\omega^2}\right)^2}; \quad (8)$$

$$E'' = \rho v_l^2 \frac{2\alpha_l v_l}{\left(1 + \frac{\alpha_l^2 v_l^2}{\omega^2}\right)^2}; \quad (9)$$

$$\mu' = \rho v_t^2 \frac{1 - \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}}{\left(1 + \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}\right)^2}; \quad (10)$$

$$\mu'' = \rho v_t^2 \frac{2\alpha_t v_t}{\left(1 + \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}\right)^2}; \quad (11)$$

$$k' = E' - \frac{4}{3}\mu'; \quad (12)$$

$$k'' = E'' - \frac{4}{3}\mu'', \quad (13)$$

де α_l і α_t – коефіцієнти поглинання поздовжньої і поперечної хвиль, ω – циклічна частота ультразвукової хвилі.

Для відомих значення дійсних і уявних частин модулів пружності доцільно визначати статичні модулі E , μ та k за наступними співвідношеннями [9]:

$$E = (E'^2 + E''^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (14)$$

$$\mu = (\mu'^2 + \mu''^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (15)$$

$$k = (k'^2 + k''^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (16)$$

Результати та обговорення. Вимірювання швидкостей поширення поздовжніх та поперечних хвиль та коефіцієнтів їх поглинання проведено на експериментальній установці [2] при частоті ультразвуку $\omega = 1884$ кГц для ряду гірських порід: аргіліту, алевроліту, пісковиків Прикарпаття, Криму та поліської серії, які з точки зору структурної організації є гетерогенними матеріалами, і основних конструкційних полімерних матеріалів: поліетилену високого тиску (ПЕВТ), поліетилену низького тиску (ПЕНТ), полівінілхлориду (ПВХ), полівінбутиралу (ПВБ), поліметилметакрилату (ПММА), полікарбонат (ПК), полістирол (ПС). Густина зразків вимірювали методом гідростатичного зважування. Експериментальні значення v_l і v_t для деяких металів та сплавів взяті із робіт [3, 9–12].

Для металів і сплавів розрахунки величин E , μ і k проводили за співвідношеннями (4)–(6). Для гетерогенних матеріалів і конструкційних полімерних матеріалів розрахунки модулів пружності проводили за співвідношеннями (7)–(16). Значення ρ , величин v_l , v_t та модулів пружності представлено в табл. 1.

Проведемо порівняння значень модулів Юнга і зсуву матеріалів розрахованих на основі структурно-акустичних параметрів та виміряних механічними методами [13, 14] (табл. 2). Для металів, сплавів та гірських порід спостерігається хороша кореляція результатів при різних методах вимірювання.

Порівняльний аналіз величин E для основних полімерних матеріалів показав, що за результатами вимірювань УЗ-методом отримуємо значення модуля Юнга в 6–7 разів більше для ПЕ, в 2,9 рази – для ПММА, в 2,3 рази – для ПВХ та ПК і в 1,8 рази – для ПС у порівнянні із значеннями отриманими при механічних вимірюваннях.

Для модуля зсуву маємо 6-ти кратне збільшення величин μ для ПЕНТ і 9-ти кратне – для ПЕВТ при вимірюваннях УЗ-методом у порівнянні із механічним методом.

Такі результати можна пояснити різною будовою металів, гірських порід і аморфних полімерів та фізичними процесами поширення УЗ-коливань у структурній організації останніх.

Таблиця. 1

Густина, швидкості поширення поздовжніх і поперечних хвиль і модулі пружності конструкційних і гетерогенних матеріалів

Матеріал	ρ , кг/м ³	v_l , м/с	v_t , м/с	ν	$E \cdot 10^{-9}$, Н/м ²	$\mu \cdot 10^{-9}$, Н/м ²	$k \cdot 10^{-9}$, Н/м ²	
Метали і сплави								
Алюміній 6061	2700	6207 [3] 6375 [10]	2916 [3] 3150 [10]	0,36 0,34	62,5 71,2	23,0 26,8	31,9 36,0	
Латунь 360	8490	4500 [3] 4430 [9]	2227 [3]	0,34	112,7	42,1	56,6	
Латунь (жовта)	8470	4160 [3]	1878 [3]	0,37	82,0	29,9	42,1	
Мідь	8920	4752 [3] 4660 [9]	2271 [3] 2337 [9]	0,35 0,33	124,4 129,8	46,0 48,7	63,1 64,8	
Сталь 304	7999	5728 [3] 5920 [11]	3057 [3] 3141 [11]	0,30 0,30	194,4 205,8	74,8 78,9	94,7 100,6	
Сталь 316	8000	5823 [3] 5720 [11]	3023 [3] 3272 [11]	0,32 0,26	192,4 215,3	73,1 85,7	94,9 101,1	
Сталь 1018	7800	5841 [3] 5890 [9]	3104 [3]	0,30	195,9	75,2	95,7	
Титан	4506	6102 [3] 6100 [9]	3085 [3]	0,33	113,9	42,9	56,7	
Гетерогенні матеріали								
Скло (Borofloat)	2220	5506 [3]	3395 [3]	0,19	61,1	25,6	26,9	
Плавлений кварц	2203	5750	3510	0,20	65,3	27,1	39,1	
		5983 [3]	3573 [3]	0,22	68,8	28,12	31,3	
		5570 [12]	3515 [12]	0,17	63,6	27,2	27,3	
Скло (Pyrogoceram)	2550	6548 [3]	3601 [3]	0,28	84,8	33,1	40,7	
Аргіліт	2950	3540	2030	0,26	36,2	12,1	20,2	
Алевроліт	2440	3125	1960	0,18	23,1	9,3	11,0	
Пісковик	2150 2200 2320 2460	3180	2090	0,12	21,7	9,4	9,2	
		3280	2060	0,17	23,7	9,3	11,2	
		3390	1995	0,24	26,7	9,2	14,4	
		3430	1780	0,32	28,9	7,8	18,6	
Конструкційні полімерні матеріали								
ПЕВТ	950	2410	1050	0,38	5,5	1,0	4,1	
		2561 [3] 2460 [9]	1113 [3]	0,38	6,2	1,2	4,7	
ПЕНТ	915	2165	945	0,38	4,3	0,8	3,2	
		2182 [3] 2080 [9]	820 [3]	0,42	4,4	0,6	3,5	
ПВХ	1397	2310	1095	0,36	7,4	1,7	5,2	
ПВБ	1146	2390	1060	0,38	6,5	1,3	4,8	
ПММА	1190 1180	2710	1375	0,33	8,7	2,3	5,7	
		2724 [3] 2730 [9]	1377 [3]	0,33	8,8	2,2	5,8	
			1430 [11]					
		2670 [12]	1121 [12]	0,39	8,4	1,5	6,4	
ПК	1210	2235	935	0,39	6,0	1,1	4,6	
		2250 [3] 2268 [10]	948 [3]	0,39	6,1	1,1	4,7	
ПС	1040	2340	1135	0,35	5,7	1,4	3,9	
		2346 [3] 2340 [9]	1157 [3]	0,34	5,7	1,4	3,9	
			1143 [10]					
		2350 [12]	1120 [12]	0,35	5,7	1,3	4,0	

Таблиця 2.

Модуль пружності ряду матеріалів визначені різними методами

Матеріал	$E \cdot 10^{-9}$, Н/м ²		$\mu \cdot 10^{-9}$, Н/м ²	
	УЗ-метод	Механічний метод	УЗ-метод	Механічний метод
Алюміній	62,5–71,2	70	23–26,8	24–28
Мідь	124	117	46	45
Сталь	192–215	180–200	73–86	75–79
Скло	61–85	50–90	26–33	26,2
Аргіліт	36,2	45	12,1	–
Алевроліт	23,1	20	9,3	–
Пісковик	21–29	20–40	7,4–9,3	–
ПЕВТ	5,5–6,2	0,8	1,0–1,2	0,12
ПЕНТ	4,3–4,4	0,7	0,6–0,8	0,12
ПВХ	7,4	2,4–4,1	1,7	–
ПММА	8,4–8,8	2,4–3,4	1,5–2,3	–
ПК	6,0–6,1	2,6	1,1	–
ПС	5,7	3–3,5	1,3–1,4	–

Висновки. Проведені експериментальні дослідження та порівняльний аналіз показали, що імерсійний ультразвуковий метод вимірювання швидкостей поширення поздовжньої та поперечної УЗ-хвиль у зразках ряду конструкційних та гетерогенних матеріалів має перспективи технологічного застосування для визначення коефіцієнта Пуассона, модуля Юнга, модуля зсуву та модуля об'ємної деформації.

Практичне впровадження ультразвукового методу може бути використане у промисловості та державних органах метрологічного контролю для створення бази даних конструкційних матеріалів. Дослідження механічних властивостей зразків масиву гірських порід, в межах гірничих виробок геотехнічних систем, дозволить прогнозувати негативні явища техногенного характеру з метою їх запобігання.

Список використаних джерел:

1. Физическая акустика / Под. ред. У. Мезон. Т. I. – М.: Мир, 1966. – 592 с.
2. Машенко В. А. Експериментальна установка для вимірювання пружних параметрів гірських порід / В. А. Машенко, О. О. Панчук, І. О. Садовенко, М. А. Бордюк // Вісник інженерної академії України. – 2012. – Вип. 3–4. – С. 60–64.
3. Ginzl E. Determining Approximate Acoustic Properties of Materials / E. Ginzl, B. Turnbull // e-Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – N. 12. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.ndt.net/article/ndtnet/2016/17_Ginzl.pdf.
4. Franko E. E. Measurement of Elastic Properties of Materials by the Ultrasonic Through-Transmission Technique / E. E. Franko, J. M. Meza, F. Buiocchi // Dyna . – 2011. – N. 168. – P. 59–64.
5. A study of PC-based ultrasonic goniometer system of surface properties and characterization of materials / S. Sani, M. H. Md. Saad, N. Jamaludin, M. P Ismail and other // Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018 – 298. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/298/1/.../pdf>.
6. Characterization of material damage by ultrasonic immersion test / A. Castellano, P. Foti, A. Fraddosio, U. Galietti and other // Procedia Engineering. – 2015. –N. 109. – P. 395–402.
7. Ландау Л. Д. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1985. – 245 с.
8. Колупаев Б. С. Релаксационные и термические свойства наполненных полимерных систем. – Львов: Вища школа, 1980. – 204 с.
9. V. V. Klepko, Contribution of Surface Rayleigh Waves to the Heat Capacity of Poly(vinyl chloride) / V. V. Klepko, B. B. Kolupaev, E. V. Lebedev, V. A. Mashchenko // Polymer Science. – Ser. A. – 2009. – V. 51. – N 9. – P. 986–990.
9. ONDT [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities/>
10. Advanced UT [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.advanced-ndt.co.uk/index.htm_files/Reference%20Chart%20-%20Velocity%20Chart.pdf
11. GE Sensing [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.instrumart.com/assets/ge-sound-speeds-and-pipe-size-data.pdf>
12. Таблицы физических величин. Справочник / Под. ред. акад. И. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
13. The Engineering Toolbox [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus_417.html.
14. Баклашов И. В. Механика подземных сооружений и конструкций крепей / И. В. Баклашов, Б. А. Картозия. – М.: Недра, 1984. – 415 с.

Стаття надійшла до редакції 20.03.2019