

УДК 624.012.45:620.179.16
DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-3

МАЩЕНКО В. А.
Одеська державна академія технічного регулювання та якості

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОГО КОЕФІЦІЄНТА ПУАССОНА ПОЛІМЕРНОГО АУКСЕТИКА ЗА ДОПОМОГОЮ ТРЬОХ ТИПІВ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ

У статті розглянуто три випадки визначення комплексного динамічного коефіцієнта Пуассона полімерного ауксетика при поширенні у ньому поздовжньої, поперечної та поверхневої акустичних хвиль.

На основі співвідношень теорії пружності і експериментальних значень швидкостей поширення поздовжньої та поперечної хвиль і коефіцієнтів їх поглинання проведені розрахунки дійсної та уявної частини коефіцієнта Пуассона для термопластичного поліуретану. Експериментальні значення швидкостей поширення поздовжніх та поперечних хвиль і коефіцієнтів їх затухання були визначені за допомогою імпульсного імерсійного ультразвукового методу.

Отримано розв'язок рівняння Релея при поширенні у ауксетик поперечної та поверхневої акустичних хвиль. Використання рівняння Релея та модельних підходів до процесів поглинання акустичних хвиль дозволило отримати співвідношення та характеристичні рівняння для розрахунку складових комплексного коефіцієнта Пуассона полімерного ауксетика при поширенні у ньому, відповідно, поверхневої та поперечної хвиль і поверхневої та поздовжньої хвиль. Запропоновано конструкцію експериментального стенду для збудження та прийому поверхневих хвиль Релея у полімерному ауксетикі з коефіцієнтом Пуассона близьким до мінус одиниці. Розроблено методику вимірювань для визначення швидкості поширення поверхневої хвилі Релея і коефіцієнту її поглинання та перевірки адекватності отриманих експериментальних даних.

Аналіз отриманих значень дійсної та уявної частин комплексного коефіцієнта Пуассона для термопластичного поліуретану вказує на адекватність запропонованих модельних представлень і хорошу відтворюваність результатів при розрахунках на основі парних експериментів.

Ключові слова: поздовжня, поперечна та поверхнева акустичні хвилі, швидкість поширення хвилі, рівняння Релея, коефіцієнт поглинання хвилі.

MASHCHENKO V.
Odessa state academy technical regulations and quality

METHOD DETERMINATION OF THE DYNAMIC POISSON'S RATION OF POLYMER AUXETIC USING THREE TYPES OF ACOUSTIC WAVES

The article considers three cases of determining the complex dynamic Poisson's ratio of a polymeric auxetic with the propagation of longitudinal, transverse and surface acoustic waves.

Based on the relations between the theory of elasticity and experimental values of the propagation velocities of longitudinal and transverse waves and their absorption coefficients, calculations of the real and imaginary part of the Poisson's ratio for thermoplastic polyurethane are performed. The experimental values of the propagation velocities of longitudinal and transverse waves and their attenuation coefficients were determined using the pulsed immersion ultrasonic method.

The solution of the Rayleigh equation for the propagation in auxetic transverse and surface acoustic waves into auxetics is obtained. The use of Rayleigh equations and model approaches to acoustic wave absorption processes allowed to obtain relations and characteristic equations for calculating the components of the complex Poisson's ratio of polymeric auxetic with the propagation of surface and transverse waves and surface and longitudinal waves, respectively.

The design of an experimental stand for excitation and reception of Rayleigh surface waves in a polymer auxetic with a Poisson's ratio close to minus one is proposed. A measurement technique has been developed to determine the propagation velocity of the Rayleigh surface wave and its absorption coefficient and to verify the adequacy of the obtained experimental data.

The analysis of the obtained values of the real and imaginary parts of the complex Poisson's ratio for thermoplastic polyurethane indicates the adequacy of the proposed model representations and good reproducibility of the results in calculations based on pair wise experiments.

Keywords: longitudinal, transverse and surface acoustic waves, wave propagation velocity, Rayleigh equation, wave absorption coefficient.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток техніки тісно пов'язаний з широким застосуванням в'язкопружних полімерних матеріалів із необхідними механічними характеристиками. В'язкопружність передбачає наявність комплексних динамічних модулів пружності: модуля Юнга (E^*), модуля зсуву (μ^*), а вимірювання величин E^* , μ^* пов'язані із динамічними навантаженнями зразків полімерних матеріалів.

До числа найбільш цікавих і перспективних конструкційних матеріалів з точки зору їх поведінки у динамічних силових полях відносяться полімери та композиційні матеріали на їх основі із від'ємним значенням коефіцієнта Пуассона – полімерні «ауксетики» [1–2].

Крім динамічних модулів пружності, однією із основних характеристик таких матеріалів є комплексний коефіцієнт Пуассона ($\nu^* = \nu' - i\nu''$) [3]. Значення дійсної та уявної частин величини ν^* рідко декларуються виробником конструкційних полімерних матеріалів, тому проблема його прямого вимірювання або визначення на основі інших параметрів фактично є досить актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Коефіцієнт Пуассона та модуль Юнга для різних типів ауксетиків обчислювалися переважно за допомогою аналітичних методів [4–6] або експериментальних вимірювань на стиск та розтяг [7–10]. Дисипації енергії під час деформацій визначалися при динамічних навантаженнях зразів [5, 7–10] або балістичних випробуваннях [11].

Запропоновані аналітичні та експериментальні методи не в повній мірі дають можливість визначити складові комплексного коефіцієнта Пуассона та механічні характеристики ауксетиків. В такому випадку достовірність експериментальних значень відповідних величин може бути підтверджена за допомогою хвильових експериментів, що відповідають часу динамічного навантаження порядку декількох мікросекунд – часу проходження ультразвукової (УЗ) хвилі через зразок ауксетика.

Формулювання мети дослідження. З використання модельних підходів до процесів поширення та поглинання поздовжньої, поперечної та поверхневої акустичних ультразвукових хвиль показати можливість визначення дійсної та уявної частин комплексного динамічного коефіцієнта Пуассона полімерного ауксетика на основі співвідношень теорії пружності та рівняння Релея при відомих експериментальних значеннях швидкостей їх поширення та коефіцієнтів поглинання.

Виклад основного матеріалу. Найбільш інформативними параметрами, які дозволяють визначати механічні характеристики в'язкопружного матеріалу є швидкості поширення акустичних УЗ-коливань різного типу. Використання методів збудження та прийому трьох типів хвиль: поздовжньої (I), поперечної (t) та поверхневої акустичної хвилі (ПАХ) Релея (R) і вимірювання швидкостей їх поширення (v_I , v_t , v_R) в ауксетиках дозволяє визначати дійсну та уявну частини величини v^* .

Поздовжня та поперечна хвилі. При відомих значеннях v_I та v_t дійсну частину коефіцієнта Пуассона полімерного ауксетика обчислюють за таким співвідношенням [12]:

$$v' = \frac{2 - \left(\frac{v_I}{v_t}\right)^2}{2 \left(1 - \left(\frac{v_I}{v_t}\right)^2\right)}. \quad (1)$$

Для визначення v'' скористаємося співвідношенням теорії пружності, яке пов'язує величини E^* , μ^* і коефіцієнт Пуассона v^* [13],

$$v^* = \frac{E^*}{2\mu^*} - 1 \quad (2)$$

та співвідношеннями для визначення уявних частин модуля Юнга (E'') і модуля зсуву (μ'') на при імерсійних УЗ-вимірюваннях [14]:

$$E'' = \rho v_I^2 \frac{\frac{2\alpha_I v_I}{\omega}}{\left(1 + \frac{\alpha_I^2 v_I^2}{\omega^2}\right)^2}; \quad (3)$$

$$\mu'' = \rho v_t^2 \frac{\frac{2\alpha_t v_t}{\omega}}{\left(1 + \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}\right)^2}, \quad (4)$$

де ρ – густина матеріалу; ω – циклічна частота ультразвукової хвилі; α_I і α_t – коефіцієнти поглинання поздовжньої і поперечної УЗ-хвиль.

З врахуванням (3) та (4) співвідношення (2) для v'' запишеться таким чином:

$$v'' = \frac{v_I^3 \alpha_I (\omega^2 + \alpha_t^2 v_t^2)^2}{2 v_t^3 \alpha_t (\omega^2 + \alpha_I^2 v_I^2)^2} - 1. \quad (5)$$

Поперечна та поверхнева хвилі. Рівнянням, що пов'язує швидкості поширення трьох типів хвиль (поздовжньої, поперечної та поверхневої) є рівняння Релея [15]:

$$\left(2 - \left(\frac{v_R}{v_t}\right)^2\right)^2 = 4 \left(2 - \left(\frac{v_R}{v_t}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} \left(2 - \left(\frac{v_R}{v_t}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Рівняння (6) можна представити у поліномному вигляді [16]:

$$\eta^6 - 8\eta^4 + 8(3 - 2\xi^2)\eta^2 - 16(1 - \xi^2) = 0, \quad (7)$$

де $\eta = \frac{v_R}{v_t} = \frac{k_t}{k_R}$; $\xi = \frac{v_t}{v_l} = \frac{k_l}{k_t}$; k_l ; k_t ; k_R – хвильові числа відповідно поздовжньої, поперечної та релєївської хвилі.

В діапазоні від'ємних значень v рівняння (7) для відношення швидкості ПАХ Релея до швидкості поперечних хвиль має наступний розв'язок:

$$\frac{v_R}{v_t} = \frac{4}{3} \left(\sqrt{2(6\xi^2 - 1)^3} \cos \left(\frac{1}{3} \left(\arccos \left(\frac{45\xi^2 - 17}{2\sqrt{2(6\xi^2 - 1)^3}} \right) + 2\pi \right) \right) + 2 \right), \quad (8)$$

примочу $\xi^2 = \frac{2v - 1}{2v - 2}$.

Розглянемо пружне ауксетик-середовище з втратами, де хвильові числа є комплексними величинами:

$$k_l^* = k_l' + ik_l''; \quad k_t^* = k_t' + ik_t''; \quad k_R^* = k_R' + ik_R''. \quad (9)$$

Нехай затухання поздовжніх і поперечних хвиль мале ($k_l' \gg k_l'', k_t' \gg k_t''$) і однакове в усіх точках ауксетик-середовища. В такому випадку комплексні хвильові числа k_l^* , k_t^* , k_R^* представимо у вигляді:

$$k_l^* = k_l'(1 + i\alpha); \quad k_t^* = k_t'(1 + i\beta); \quad k_R^* = k_R'(1 + i\gamma), \quad (10)$$

де $\alpha = \frac{k_l''}{k_l'}$; $\beta = \frac{k_t''}{k_t'}$; $\gamma = \frac{k_R''}{k_R'}$ – малі дійсні поправки, що чисельно рівні коефіцієнтам поглинання α_l , α_t

та ПАХ Релея (α_R) на довжині відповідної хвилі (λ_l ; λ_t ; λ_R):

$$\alpha = \alpha_l \lambda_l; \quad \beta = \alpha_t \lambda_t; \quad \gamma = \alpha_R \lambda_R. \quad (11)$$

Для визначення v' , v'' повернемося до характеристичного рівняння (7), яке при комплексних k_l^* , k_t^* , k_R^* має такий вигляд:

$$\eta'^6 \frac{(1 + i\beta)^6}{(1 + i\gamma)^6} - 8\eta'^4 \frac{(1 + i\beta)^4}{(1 + i\gamma)^4} + 8\eta'^2 \frac{(1 + i\beta)^2}{(1 + i\gamma)^2} \left(3 - 2|\xi^*|^2 \right) - 16 \left(1 - |\xi^*|^2 \right) = 0, \quad (12)$$

де $\eta^* = \eta' + i\eta''$; $|\eta^*|^2 = \frac{|k_t^*|^2}{|k_R^*|^2}$; $\xi^* = \xi' + i\xi''$; $|\xi^*|^2 = \frac{|k_l^*|^2}{|k_t^*|^2}$.

Прирівнюючи до нуля дійсну і уявну частини рівняння та нехтуючи членами порядку α^2 , β^2 , γ^2 і вище отримаємо наступні розв'язки для ξ' , ξ'' комплексного параметра ξ^* :

$$\xi'^2 = \frac{\eta'^6 - 8\eta'^4 + 24\eta'^2 - 16}{16(\eta'^2 - 1)}; \quad (13)$$

$$\xi''^2 = \frac{3\eta'^6\beta - 8\eta'^4(2\beta + \gamma) + 24\eta'^2(\beta + 2\gamma) - 48\beta}{16\eta'^2(\beta + 2\gamma) - 48\beta}. \quad (14)$$

Враховуючи, що

$$\xi'^2 = \frac{2v' - 1}{2v' - 2} \quad (15)$$

співвідношення (13) для визначення v' переписується таким чином:

$$v' = \frac{\eta'^6 - 8\eta'^4 + 16\eta'^2 - 8}{\eta'^6 - 8\eta'^4 + 8\eta'^2}, \quad (16)$$

Значення уявної частини комплексного v^* будемо визначати при відомих v' , ξ'^2 та ξ''^2 із рівняння:

$$\xi'^2 + \xi''^2 = \frac{2\sqrt{v'^2 + v''^2} - 1}{2\sqrt{v'^2 + v''^2} - 2}. \quad (17)$$

Поздовжня та поверхнева хвилі. Розглянемо нову комплексну змінну ζ^* ($\zeta^* = \zeta' + i\zeta''$), яка рівна

$|\zeta^*|^2 = \frac{|k_l^*|^2}{|k_R^*|^2}$. Характеристичне рівняння (7) в такому випадку буде мати такий вигляд:

$$\frac{\zeta'^6}{(|\xi^*|^2)^3} \frac{(1+i\alpha)^6}{(1+i\gamma)^6} - 8 \frac{\zeta'^4}{(|\xi^*|^2)^2} \frac{(1+i\alpha)^4}{(1+i\gamma)^4} + 8 \frac{\zeta'^2}{|\xi^*|^2} \frac{(1+i\alpha)^2}{(1+i\gamma)^2} (3-2|\xi^*|^2) - 16(1-|\xi^*|^2) = 0, \quad (18)$$

Для знаходження дійсної та уявної частини комплексного коефіцієнта Пуассона v^* потрібно, в такому випадку, чисельно розв'язувати наступні рівняння відносно ξ'^2 та ξ''^2 при відомому значенні ζ'^2 :

$$16(\xi'^2)^4 - 16(\zeta'^2 + 1)(\xi'^2)^3 + 24\zeta'^2(\xi'^2)^2 - 8\zeta'^4(\xi'^2) + \zeta'^6 = 0; \quad (19)$$

$$48\gamma(\xi'^2)^4 - 16\zeta'^2(\alpha + 2\gamma)(\xi'^2)^3 - 48\gamma(\xi'^2)^3 + 24\zeta'^2(\alpha + 2\gamma)(\xi'^2)^2 - 8\zeta'^4(2\alpha + \gamma)(\xi'^2) + 3\alpha\zeta'^6 = 0. \quad (20)$$

Величини v' та v'' знаходимо із співвідношень (15) і (17).

Результати та обговорення. Вимірювання швидкостей поширення v_l , v_t та коефіцієнтів їх поглинання α_l , α_t проводили для термопластичного поліуретану (ТПУ), синтезованого на основі 4,4-дифенілметандіізоціанату, 1,4-бутандіола і поліокситетрамітиленгліколю з ММ = 1500 за методикою роботи [2] при частоті ультразвуку $\omega = 1,884$ МГц. Результати вимірювань v_l , v_t та значення v' , v'' представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Експериментальні значення швидкостей поширення поздовжньої, поперечної, релеївської хвиль та коефіцієнтів їх згасання і значення дійсної та уявної частин комплексного коефіцієнта Пуассона визначенні трьома способами

Параметр	Значення
v_l , м/с	1635
v_t , м/с	1415
α_l , Нп/м	36
α_t , Нп/м	197
v' (за співвідношенням (1))	- 0,99
v'' (за співвідношенням (5))	- 0,85
α	0,196
β	0,929
v_R , м/с	980
α_R , Нп/м	301
γ	0,983
v' (за співвідношенням (16))	- 0,98
v'' (розв'язок рівняння (17) із врахуванням (14))	- 1,82
v' (із співвідношення (15) з врахуванням (19))	- 0,97
v'' (із співвідношенням (16) з врахуванням (20))	- 1,60

Збудження та прийом ПАХ Релея проводили за допомогою гребінчастої структури, що створює на поверхні твердого тіла періодичну сукупність нормальних збурень з просторовим періодом λ_R [16]. Схема експериментального стану та експериментальний стенд із УЗ-перетворювачами МА-300А1 фірми Murata представлені на рис. 1, 2. Значення λ_R обчислювали за співвідношенням:

$$\lambda_R = \frac{2\pi v_R}{\omega}. \quad (21)$$

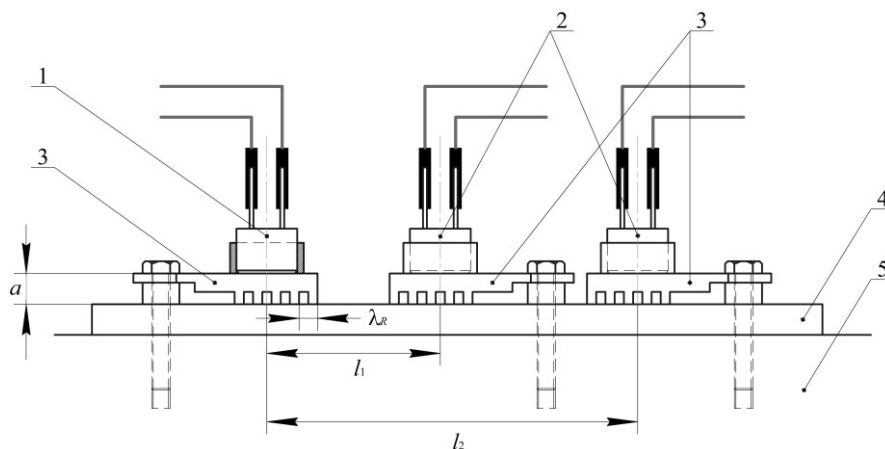


Рис. 1. Схема експериментального стану для збудження та прийому ПАХ:
 1 – УЗ-перетворювач (випромінювач) МА-300А1; 2 – УЗ-перетворювач (приймач) МА-300А1;
 3 – гребінчаста структура; 4 – зразок матеріалу; 5 – поглинаюча підкладка

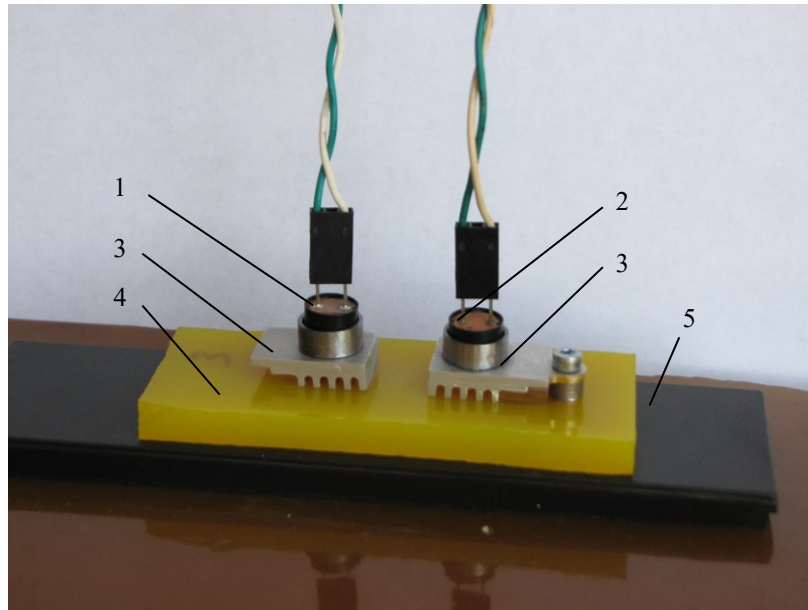


Рис. 2. Експериментальний стенд:
 1 – УЗ-перетворювач (випромінювач) МА-300А1; 2 – УЗ-перетворювач (приймач) МА-300А1;
 3 – гребінчаста структура; 4 – зразок матеріалу; 5 – поглинаюча підкладка

Для швидкості ПАХ Релея $v_R = 976$ м/с, визначеної із співвідношення (8) при $v \cong -1$, довжина хвилі рівна $\lambda_R \cong 3,3$ мм.

Експериментальне значення v_R будемо визначати за виміряним часом (τ) проходження релеївської хвилі по поверхні зразка і розраховувати за таким співвідношенням:

$$v_R = \frac{v_l l}{v_l \tau - 2a}, \quad (22)$$

де l – між центрами УЗ-перетворювачів, v_l – швидкість поздовжньої хвилі в матеріалі гребінчастої структури; a – висота гребінчастої структури.

Для оцінки похибки та перевірки адекватності отриманих значень v_R вимірювали час ($\tau_{(standard)}$) проходження імпульсу релеївської хвилі по поверхні еталонного матеріалу для якого значення $v_{R(standard)}$ відомо. При однаковій відстані між УЗ-перетворювачами для обох матеріалів значення v_R визначаємо за таким співвідношенням:

$$v_R = \frac{v_{R(standard)} l}{v_{R(standard)} (\tau - \tau_{(standard)}) + l}. \quad (23)$$

В якості еталону використовували плавлений кварц $v_{R(standard)} = 3400$ м/с [17].

Коефіцієнт поглинання α_R релеївських хвиль в матеріалі визначаємо за таким співвідношенням:

$$\alpha_R = \frac{1}{l_2 - l_1} \ln \frac{A_1}{A_2}, \quad (24)$$

де A_1 – амплітуда сигналу на УЗ-перетворювачі, що знаходиться на відстані l_1 ; A_2 – амплітуда сигналу на УЗ-перетворювачі, що знаходиться на відстані l_2 .

Вимірювання τ та A_1 , A_2 УЗ-сигналу при прийомі ПАХ Релея проводили за допомогою розробленого електронного блоку із аналогово-цифровим інтерфейсом на базі операційних підсилювачів та швидкодіючих компараторів, роботою яких керує однокристальний мікроконтролер Atmega48 [18]. Імпульс збудження ПАХ на УЗ-перетворювачі (передавачі) та сигнал від УЗ-перетворювача (приймача) контролювали за допомогою цифрового осцилографа (див. рис. 3).

Експериментальні значення v_R і α_R представлені в таблиці 1. Абсолютна похибка визначення швидкості ПАХ Релея не перевищує 4 м/с, а для коефіцієнта поглинання – 2 Нп/м.

Аналіз отриманих результатів для дійсної частини комплексного v^* показує, що для трьох випадків вимірювань відхилення v' її середнього значення рівне 0,1, що складає 1 %. Для величини v'' комплексного коефіцієнта Пуассона середнє значення рівне – 1,42. Величини абсолютних відхилень для трьох експериментальних значень v'' , визначених на основі парних експериментів ($l, t; t, R; l, R$), відповідно дорівнюють: 0,57; 0,40; 0,18.

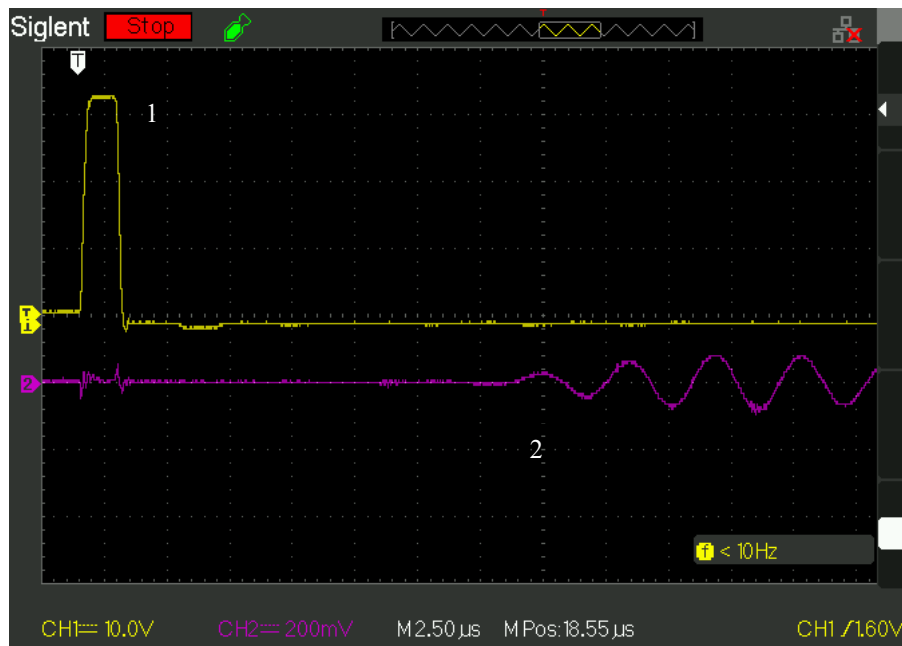


Рис. 3. Осцилограми імпульсу збудження ПАХ 1 на УЗ-перетворювачі (передавачі) та прийнятого сигналу ПАХ 2 на УЗ-перетворювачі (приймачі) експериментального стенду

Висновки. Використання співвідношень теорії пружності і рівняння Релея при відомих швидкостях поширення поздовжньої, поперечної та поверхневої акустичних хвиль і коефіцієнтів їх поглинання дає можливість проводити розрахунки дійсної та уявної частин комплексного динамічного коефіцієнта Пуассона полімерного акустета.

Запропонована експериментальна методика визначення швидкості поширення поверхневої хвилі Релея та коефіцієнта її поглинання у полімерному акусетикі. Отримані значення дійсної та уявної частин комплексного коефіцієнта Пуассона для термопластичного поліуретану вказують на адекватність запропонованих модельних представлень для процесів поширення та поглинання акустичних хвиль трьох типів і хорошу відтворюваність результатів при розрахунках на основі парних експериментів.

Експериментальний стенд при незначних конструктивних змінах може бути використаний при вимірюваннях для полімерних акусетиків із більшим значенням дійсної частини коефіцієнта Пуассона та в'язкопружних полімерних матеріалів із додатнім значенням її величини.

Література

1. Конёк Д. А. Материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона (обзор) / Д. А. Конёк, К. В. Войцеховски, Ю. М. Плещачевский, С. В. Шилько // Механика композитных материалов и конструкций (Москва). – 2004. – Т. 10. – № 1. – С. 35–69.
2. Визначення динамічних модулів пружності полімерних акусетиків за допомогою імпульсних імєрсійних вимірювань швидкостей поширення ультразвукових хвиль / В. А. Машенко, В. П. Квасніков, М. А. Бордюк, Т. М. Шевчук // Збірник наукових праць ОДАТРА. – 2019. – № 1(14). – С. 5–11.
3. Pritz T. Measurement methods of complex Poisson's ratio of viscoelastic materials / T. Pritz // Applied Acoustics. – 2000. – V. 60. – P. 279–292.
4. Novak N. Auxetic Cellular Materials – a Review / N. Novak, M. Vesenjak, Z. Ren // Journal of Mechanical Engineering. – 2016. – V. 62. – N. 9. – P. 485–493.
5. Elasticity of anti-tetrachiral anisotropic lattices / Y. J. Chen, F. Scarpa, Y. J. Liu, J. S. Leng // International Journal of Solids and Structures. – 2013. – Vol. 50. – No. 6. – P. 996–1004.
6. A Numerical study of auxetic composite panels under blast loadings / G. Imbalzano, P. Tran, T. D. Ngo, P. V. S. Lee // Composite Structures. – 2016. – V. 135. – P. 339–352.
7. Dynamic tests for energy absorption by selected auxetic fabrics / P. Szurgott, M. Klasztorny, T. Niezgoda, D. Miedzinska, R. Gieleta // Journal of Engineered Fibers and Fabrics. – 2017. – V. 12. – Is. 4. – P. 7–14.
8. Negative through-the-thickness Poisson's ratio of elastic-viscoplastic angle-ply carbon fiber-reinforced plastic laminates: homogenization analysis / T. Matsuda, K. Goto, N. Kubota, N. Ohno // International Journal of Plasticity. – 2014. – V. 63. – P. 152–169.
9. Static and modal analysis of low porosity thin metallic auxetic structures using speckle interferometry and digital image correlation / L. Francesconi, M. Taylor, K. Bertoldi, A. Baldi // Experimental Mechanics. – 2018. – V. 58. – Is. 2. – P. 283–300.
10. Jiang L. Finite Element Modeling of Multilayer Orthogonal Auxetic Composites under Low-Velocity Impact / L. Jiang, H. Hu // Materials. – 2017. – V. 10. – N. 8. – 908.
11. A comparative study of ballistic resistance of sandwich panels with aluminum foam and auxetic honeycomb cores / S. Yang, C. Qi, D. Wang, R. Gao, H. Hu, J. Shu // Advances in Mechanical Engineering. – 2015. – Режим доступу: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1155/2013/589216>.
12. Ландау Л. Д. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Москва: Наука, 1985. – 245 с.
13. Kulik V. M. Physical principles of methods for measuring viscoelastic properties / V. M. Kulik, A. V. Boiko // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2018. – V. 59. – No. 5. – P. 874–885.

14. Машченко В. А. Визначення модулів пружності конструкційних та гетерогенних матеріалів ультразвуковим методом / В. А. Машченко // Міжвузівський збірник наукових праць „Наукові нотатки”. – 2019. – Вип. 65. – С. 165–169.
15. Физическая акустика / Под. ред. У. Мезона, Р. Терстона. Т. VI. – Москва: Мир, 1973. – 432 с.
16. Викторов И. А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах / И. А. Викторов. – М.: Наука, 1981. – 288 с.
17. Кулаков М. А. Особенности измерения поверхностных акустических волн акустическим микроскопом / М. А. Кулаков, А. И. Морозов // Акустический журнал. – 1985. – Т. 31. – № 6. – С. 817–820.
18. Машченко В.А. Аналогово-цифровий інтерфейс для вимірювання амплітуди та часу проходження ультразвукового сигналу / В. А. Машченко // Міжнародний науково-технічний журнал „Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”. – 2019. – № 2 (64). – С. 34–39.

References

1. Koniok D. A. Materials with negative Poisson's ratio. (The review) / D. A. Koniok, K. V. Voitsekhovskiy, Yu. M. Pleskachevsky, S. V. Shilko // Journal on Composite Mechanics and Design (Moscow). – 2004. – V. 10. – N. 1. – P. 35–69.
2. Determination of dynamic modules of elastic of polymer auxetics with the help of pulse immersion measurements of propagation velocities of ultrasonic wave / V. A. Mashchenko, V. P. Kvasnikov, M. A. Bordyuk, T. M. Shevchuk // Collection of scientific works OSATRO. – 2019. – № 1 (14). – P. 5–11.
3. Pritz T. Measurement methods of complex Poisson's ratio of viscoelastic materials / T. Pritz // Applied Acoustics. – 2000. – V. 60. – P. 279–292.
4. Novak N. Auxetic Cellular Materials – a Review / N. Novak, M. Vesenjajk, Z. Ren // Journal of Mechanical Engineering. – 2016. – V. 62. – N. 9. – P. 485–493.
5. Elasticity of anti-tetrachiral anisotropic lattices / Y. J. Chen, F. Scarpa, Y. J. Liu, J. S. Leng // International Journal of Solids and Structures. – 2013. – Vol. 50. – No. 6. – P. 996–1004.
6. A Numerical study of auxetic composite panels under blast loadings / G. Imbalzano, P. Tran, T. D. Ngo, P. V. S. Lee // Composite Structures. – 2016. – V. 135. – P. 339–352.
7. Dynamic tests for energy absorption by selected auxetic fabrics / P. Szurgott, M. Klasztorny, T. Niezgoda, D. Miedzinska, R. Gieleta // Journal of Engineered Fibers and Fabrics. – 2017. – V. 12. – Is. 4. – P. 7–14.
8. Negative through-the-thickness Poisson's ratio of elastic-viscoplastic angle-ply carbon fiber-reinforced plastic laminates: homogenization analysis / T. Matsuda, K. Goto, N. Kubota, N. Ohno // International Journal of Plasticity. – 2014. – V. 63. – P. 152–169.
9. Static and modal analysis of low porosity thin metallic auxetic structures using speckle interferometry and digital image correlation / L. Francesconi, M. Taylor, K. Bertoldi, A. Baldi // Experimental Mechanics. – 2018. – V. 58. – Is. 2. – P. 283–300.
10. Jiang L. Finite Element Modeling of Multilayer Orthogonal Auxetic Composites under Low-Velocity Impact / L. Jiang, H. Hu // Materials. – 2017. – V. 10. – N. 8. – 908.
11. A comparative study of ballistic resistance of sandwich panels with aluminum foam and auxetic honeycomb cores / S. Yang, C. Qi, D. Wang, R. Gao, H. Hu, J. Shu // Advances in Mechanical Engineering. – 2015. – Режим доступу: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1155/2013/589216>.
12. Landau L. D. Theory of Elasticity / L. D. Landau, E. M. Lifshitz. – Moscow: Nauka, 1985. – 245 p.
13. Kulik V. M. Physical principles of methods for measuring viscoelastic properties / V. M. Kulik, A. V. Boiko // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2018. – V. 59. – No. 5. – P. 874–885.
14. Mashchenko V. A. Determination of elasticity modules of constructional and heterogeneous materials by ultrasonic method / V. A. Mashchenko // Interuniversity collection of scientific works “Scientific notes”. – 2019. – V. 65. – P. 165–169.
15. Physical acoustics / Edited by W. Meson, R. Thurston. Vol. VI. – Moscow: Mir, 1973. – 432 p.
16. Viktorov I. A. Sound surface waves in solids / I. A. Viktorov. – Moscow: Nauka, 1981. – 288 p.
17. Kulakov M. A. Peculiarities of measuring surface acoustic waves with an acoustic microscope / M. A. Kulakov, A. I. Morozov // Acoustic journal. – 1985. – V. 31. – N. 6. – P. 817–820.
18. Mashchenko V. A. Analog-digital interface for measurement of the amplitude and time of transition of the ultrasonic signal / V. A. Mashchenko // International Scientific-technical journal “Measuring and computing devices in technological processes”. – 2019. – Iss. 2. (64). – P. 34–39.

Надійшла / Paper received: 07.04.2020

Надрукована / Paper Printed : 04.06.2020