

УДК 677.017.5 | ЗДОРЕНКО В. Г., БАРИЛКО С. В., ЛІСОВЕЦЬ С. М., ШИПКО Д. О.
Київський національний університет технологій та дизайну

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОХОДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ КРІЗЬ ДВОШАРОВИЙ МАТЕРІАЛ ІЗ СКЛАДНОЮ СТРУКТУРОЮ ПРИ КОНТРОЛІ ЙОГО ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Мета. Дослідити проходження ультразвукових хвиль крізь двошаровий матеріал із складною структурою при безконтактному контролі його технологічних параметрів.

Методика. У роботі використаний безконтактний ультразвуковий метод контролю технологічних параметрів матеріалів із складною структурою, який враховує згасання ультразвукових хвиль.

Результати. Обґрунтовано, що згасанням ультразвукового сигналу для матеріалу із значними порами при поперечному його зондуванні можна знехтувати у порівнянні із згасанням у матеріалі без наскрізних пор. Наведено результати досліджень впливу товщини матеріалу з порами на амплітудні співвідношення ультразвукових хвиль.

Наукова новизна. Отримано залежності амплітуд ультразвукових хвиль, одна з яких проходить крізь двошаровий суцільний матеріал, а інша проходить двошаровий матеріал з порами, з врахуванням залежності їх згасання від товщини матеріалу. У роботі одержані залежності фазового зсуву ультразвукових хвиль, які відбилися від двошарового матеріалу без пор, та хвиль, що відбилися від двошарового матеріалу з порами, від загальної товщини контрольованого матеріалу, якщо порівнювати фазу цих хвиль з падаючими коливаннями. Також отримані залежності зміни амплітуд хвиль у часі для імпульсного ультразвукового сигналу, який проходить крізь контрольований матеріал.

Практична значимість. Запропоновано використовувати імпульсний ультразвуковий сигнал для оперативного безконтактного контролю технологічних параметрів двошарових матеріалів із складною структурою. Проведений аналіз показав, що отримані вирази для імпульсних ультразвукових сигналів, які можуть взаємодіяти з пористими матеріалами, можна використати для створення нових методів та засобів неруйнівного безконтактного контролю технологічних параметрів матеріалів із складною структурою. Зазначене дозволить створювати складні у комплексі та універсальні прилади безконтактного контролю різних технологічних параметрів для композитних матеріалів з порами, які сьогодні піддають тільки контактному руйнівному контролю, що не дозволяє вести оперативний моніторинг безпосередньо на виробництві.

Ключові слова: двошаровий матеріал, пори, ультразвукові хвилі, згасання, амплітудні співвідношення хвиль, технологічні параметри, безконтактний контроль.

Вступ. Контроль технологічних параметрів композитів (матеріалів з двома або більше складовими) та матеріалів із складною структурою (часто це текстильні матеріали), таких як товщина, поверхнева густина складових композиційних матеріалів; лінійна щільність текстильних стрічок для різного призначення та інших параметрів, що впливають безпосередньо на якість готової продукції [1], можна проводити як за допомогою безперервного випромінювання ультразвукових хвиль, так і використовуючи його в імпульсному режимі [2-7]. Зазначене доцільне та можливе при використанні безконтактних датчиків, що є однією з основних умов для застосування оперативного моніторингу на виробництві при первинному зборі вимірювальної інформації.

При використанні безперервного випромінювання можуть відбуватися явища накладання перевідбитих хвиль від поверхонь датчиків та контрольованого матеріалу, розігріву п'єзокераміки, яка може втрачати свої робочі характеристики та можливості, а

також й інші небажані негативні процеси при зондуванні листів, полотен або стрічок, що ускладнює обробку вимірювального сигналу. Тому доцільно застосовувати саме імпульсне випромінювання для безконтактного контролю матеріалів із складною структурою.

Постановка завдання. Різні матеріали, технологічні параметри яких необхідно контролювати, можуть складатися з одного, двох або більше шарів, в яких можуть бути пори. Зазначене докорінно змінює характер сигналу, який проходить крізь такий матеріал. В основному враховуючи цю проблему, при вирішенні якої необхідно проводити додаткову обробку вимірювального сигналу та застосовувати нові методи отримання інформативних параметрів зондуючих хвиль (це дасть можливість тільки у комплексі спростити цю задачу), сьогодні у світі не існує розвинутого напрямку безконтактного визначення технологічних параметрів матеріалів із складною структурою. Дослідження взаємодії імпульсного випромінювання з різними багат шаровими матеріалами, в яких можуть бути наявні пори (матеріали із складною структурою) [8], дадуть можливість розробити нові методи контролю технологічних параметрів [9, 10] для різних матеріалів, вони є актуальними для легкої промисловості у цілому.

Оскільки сучасні матеріали можуть мати різну композицію шарів в своєму складі із різною внутрішньою структурою, то розглянемо випадки проходження ультразвукового сигналу крізь можливі складові шари композиційних матеріалів без пор та з їхнім врахуванням. Слід зазначити, що для сучасних матеріалів може використовуватися комбінація складових шарів з порами та без них, тоді при розрахунку амплітуди ультразвукових хвиль, які проходять крізь матеріал або відбиваються від нього, необхідно враховувати розсіювання сигналу та його можливе згасання в матеріалі.

Найпростішим випадком композиційного матеріалу є двошаровий. Така композиція з різних складових матеріалів за щільністю та швидкістю розповсюдження хвиль в їхньому середовищі представляє собою різні межі для проходження ультразвукових коливань.

Результати дослідження. Ультразвуковий імпульсний сигнал у вигляді функції зміни тиску в хвилі $P_1(t')$, що пройшов контрольований двошаровий суцільний матеріал з врахуванням часу t' розповсюдження хвилі та колової частоти ω , може бути показаний як:

$$P_1(t') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) S(\omega) \cdot e^{j\omega t'} d\omega, \quad 1)$$

де $S(\omega)$ – спектральна щільність падаючого ультразвукового сигналу; $W(\omega)$ – комплексний коефіцієнт проходження ультразвукових хвиль в матеріалі з врахуванням згасання.

Розглянемо середовище повітря з акустичним опором Z_1 ($Z_1 = \rho_1 c_1$, де $\rho_1 c_1$ – об'ємна щільність середовища та швидкість розповсюдження в ньому ультразвукової хвилі). Сам матеріал суцільний без пор з товщиною першого шару h_1 , що має акустичний опір Z_2 ($Z_2 = \rho_2 c_2$, де $\rho_2 c_2$ – об'ємна щільність складового першого шару матеріалу та швидкість розповсюдження в його середовищі ультразвукової хвилі відповідно), другий шар матеріалу з товщиною шару h_2 , що має акустичний опір Z_3 ($Z_3 = \rho_3 c_3$, де $\rho_3 c_3$ – об'ємна щільність складового другого шару матеріалу та швидкість розповсюдження в його середовищі

ультразвукової хвилі відповідно), останній шар спирається на середовище з акустичним опором Z_4 .

Комплексний коефіцієнт проходження ультразвукових хвиль крізь двошаровий матеріал при $Z_2 > Z_1$, $Z_3 > Z_1$, $Z_2 > Z_4$, $Z_3 > Z_4$ можна подати так:

$$W(\omega) = \frac{W_{12}W_{23}W_{34} \cdot e^{j\left(\left(\frac{\omega b}{c_2} + j\alpha_{23}\right) \cdot h_1 + \left(\frac{\omega b}{c_3} + j\alpha_{33}\right) \cdot h_2\right)}}{1 - (1 - (1 - V_{21}V_{34})(1 + V_{23})(1 + V_{32})) \cdot e^{2j\left(\left(\frac{\omega b}{c_2} + j\alpha_{23}\right) \cdot h_1 + \left(\frac{\omega b}{c_3} + j\alpha_{33}\right) \cdot h_2\right)}}, \quad (2)$$

де W і V – відповідні коефіцієнти проходження і відбиття хвиль на межах відповідних середовищ (перший індекс позначає середовище, з якого падає хвиля, а другий – середовище, в яке проходить, або, від якого відбивається хвиля); $b = \omega / \omega_0$ – коефіцієнт відношення несучої колової частоти та колової частоти заповнення імпульсного сигналу; α_{23}, α_{33} – коефіцієнт згасання ультразвукових хвиль у першому та другому шарах матеріалу відповідно.

Якщо взяти матеріал, в якому $h_1 = h_2$ або $h_1 \approx h_2$ (випадки, які часто можуть зустрічатися на практиці), тоді вираз (2) можна показати так:

$$W(\omega) = \frac{W_{12}W_{23}W_{34} \cdot e^{j\left(\frac{\omega b}{c_{23}} + j\alpha_3\right) \cdot (h_1 + h_2)}}{1 - (1 - (1 - V_{21}V_{34})(1 + V_{23})(1 + V_{32})) \cdot e^{2j\left(\frac{\omega b}{c_{23}} + j\alpha_3\right) \cdot (h_1 + h_2)}}, \quad (3)$$

де α_3 – загальний коефіцієнт згасання ультразвукових хвиль у матеріалі; $c_{23} = (c_2 + c_3) / 2$ – середня швидкість розповсюдження ультразвукової хвилі в двошаровому текстильному матеріалі.

Вираз (3) можна записати ще як суму геометричної прогресії у наступному вигляді:

$$W(\omega) = W_{12}W_{23}W_{34} \sum_{N=0}^{\infty} (1 - (1 - V_{21}V_{34})(1 + V_{23})(1 + V_{32}))^N \times e^{-j(2N+1)\left(-j\frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_3\right) \cdot (h_1 + h_2)}, \quad (4)$$

де N – кількість перевідбивань хвиль, що дорівнює 0, 1, 2, 3, ..., ∞.

Відповідні значення для W і V можна записати як:

$$W_{12} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}, \quad V_{12} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad W_{21} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad V_{21} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}, \quad W_{34} = \frac{2Z_3}{Z_3 + Z_4},$$

$$W_{23} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_3}, \quad V_{23} = \frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3}, \quad W_{32} = \frac{2Z_3}{Z_2 + Z_3}, \quad V_{32} = \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2}, \quad 5)$$

$$V_{34} = \frac{Z_3 - Z_4}{Z_3 + Z_4},$$

тоді, зробивши підстановку залежностей (5) в (4), комплексний коефіцієнт проходження можна показати так:

$$W(\omega) = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_3} \cdot \frac{2Z_3}{Z_3 + Z_4} \times$$

$$\times \sum_{N=0}^{\infty} \left(1 - \left(1 - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \cdot \frac{Z_3 - Z_4}{Z_3 + Z_4} \right) \left(1 + \frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) \left(1 + \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2} \right) \right)^N \times \quad 6)$$

$$\times e^{-(2N+1) \left(-j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_3 \right) \cdot (h_1 + h_2)},$$

а спектральну щільність можна представити як:

$$S(\omega) = \frac{P_0 \tau_0 \sqrt{\pi}}{2 \ln \sqrt{2}} \cdot e^{-\left(\frac{(\omega - \omega_0) \tau_0}{4 \ln \sqrt{2}} \right)^2}, \quad 7)$$

де P_0 – тиск у падаючій ультразвуковій хвилі на поверхню матеріалу; τ_0 – тривалість імпульсу; ω_0 – колова частота заповнення імпульсного сигналу.

Якщо враховувати значну нерівність акустичних опорів $Z_1 \ll Z_2$ та $Z_1 \ll Z_3$ у виразі (6) та підставити його разом із (7) в (1), тоді імпульсний ультразвуковий сигнал запишемо у наступному виді:

$$P_1(t') = \frac{4}{1 + \frac{Z_2}{2Z_3} + \frac{Z_3}{2Z_2} + \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_3}{2Z_1}} \times$$

$$\times \sum_{N=0}^{\infty} \left(1 - \left(1 - \frac{Z_2(Z_3 - Z_1) + Z_1(Z_1 - Z_3)}{Z_2(Z_3 + Z_1) + Z_1(Z_1 + Z_3)} \right) \left(1 + \frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) \left(1 + \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2} \right) \right)^N \times \quad 8)$$

$$\times \frac{P_0 \tau_0}{4 \sqrt{\pi} \ln \sqrt{2}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\left(\frac{(\omega - \omega_0) \tau_0}{4 \ln \sqrt{2}} \right)^2 - (2N+1) \left(-j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_3 \right) \cdot (h_1 + h_2) - j\omega t} d\omega,$$

де t – поточний час. Проведемо перетворення виразу (8) в показнику експоненти, яке можна подати як:

$$\begin{aligned}
 & -\left(\frac{(\omega - \omega_0)\tau_0}{4 \ln \sqrt{2}}\right)^2 - (2N+1)\left(-j\frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_3\right) \cdot (h_1 + h_2) - j\omega t = -\left(\frac{\tau_0}{4 \ln \sqrt{2}}\right)^2 \omega^2 + \\
 & + \left(j\left(\frac{b(2N+1)(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t\right) + \frac{2\omega_0\tau_0^2}{(4 \ln \sqrt{2})^2} \right) \omega - \left(\frac{\omega_0\tau_0}{4 \ln \sqrt{2}}\right)^2 - \alpha_3 \cdot (2N+1)(h_1 + h_2).
 \end{aligned} \tag{9}$$

Провівши перетворення та підставивши вираз (9) в (8), ультразвуковий імпульсний сигнал після проходження двошарового матеріалу (див. рис. 1,а) можна показати як:

$$\begin{aligned}
 P_1(t') &= \frac{4}{1 + \frac{Z_2}{2Z_3} + \frac{Z_3}{2Z_2} + \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_3}{2Z_1}} \times \\
 & \times \sum_{N=0}^{\infty} \left(1 - \left(1 - \frac{Z_2(Z_3 - Z_1) + Z_1(Z_1 - Z_3)}{Z_2(Z_3 + Z_1) + Z_1(Z_1 + Z_3)} \right) \left(1 + \frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) \left(1 + \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2} \right) \right)^N \times \\
 & \times \frac{P_0\tau_0}{4\sqrt{\pi} \ln \sqrt{2}} \cdot e^{-\left(\frac{\omega_0\tau_0}{4 \ln \sqrt{2}}\right)^2 - \alpha_3 \cdot (2N+1)(h_1 + h_2)} \times \\
 & \times \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\left(\frac{\tau_0}{4 \ln \sqrt{2}}\right)^2 \omega^2 + \left(j\left(\frac{b(2N+1)(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t\right) + \frac{2\omega_0\tau_0^2}{(4 \ln \sqrt{2})^2} \right) \omega} d\omega.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Визначивши інтеграл в (10), запишемо цей вираз у вигляді дійсної $Re P_1(t')$ та уявної $Im P_1(t')$ частини імпульсного ультразвукового сигналу, що пройшов крізь контрольований двошаровий матеріал у такому вигляді:

$$\begin{aligned}
 P_1(t') &= Re P_1(t') + j Im P_1(t') = P_0 \cdot \frac{4}{1 + \frac{1}{2}\left(\frac{Z_2}{Z_3} + \frac{Z_3}{Z_2} + \frac{Z_2 + Z_3}{Z_1}\right)} \times \\
 & \times \sum_{N=0}^{\infty} \left(1 - \left(1 - \frac{Z_2(Z_3 - Z_1) + Z_1(Z_1 - Z_3)}{Z_2(Z_3 + Z_1) + Z_1(Z_1 + Z_3)} \right) \left(1 + \frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) \left(1 + \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2} \right) \right)^N \times \\
 & \times \left(\cos \left(\omega_0 \left(\frac{(h_1 + h_2)}{c_{23}} b(2N+1) - t \right) \right) + j \sin \left(\omega_0 \left(\frac{(h_1 + h_2)}{c_{23}} b(2N+1) - t \right) \right) \right) \times \\
 & \times \exp \left(-\frac{\left(\frac{(h_1 + h_2)}{c_{23}} b(2N+1) - t \right)^2}{\left(\frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \alpha_3 \cdot (2N+1)(h_1 + h_2) \right).
 \end{aligned} \tag{11}$$

Одиничну амплітуду падаючої ультразвукової хвилі на поверхню двошарового матеріалу можна подати як:

$$A_0(t) = e^{-\left(\frac{t \ln 2}{\tau_0}\right)^2} \cdot \cos(\omega_0 t). \quad (12)$$

При поперечному безконтактному прозвучуванні контрольованих шарів більша частина ультразвукових хвиль, в основному, проходить повітряні проміжки середовищ до та після матеріалу, а також проміжки пор (при їх наявності), оминаючи даний матеріал. Тому потрібно враховувати, що при розповсюдженні гармонічної хвилі в повітрі її форма з часом наближається до дзвіноподібної. З цих причин ми розглядаємо ультразвуковий імпульсний сигнал такої форми. Він застосовується при зондуванні різних матеріалів, зміна фазового зсуву якого може впливати на детектування пікового значення амплітуд хвиль, яке пов'язане із зміною часових затримок, необхідних для налаштування селекторів інформаційних сигналів вимірювальних каналів. Слід зазначити, що затримка в середовищі матеріалу (при проходженні та відбитті сигналу від контрольованого зразка) враховується вже у виразах самих комплексних коефіцієнтів проходження та відбиття хвиль.

Спочатку розглянемо амплітуду хвилі імпульсного сигналу, який пройшов два шари матеріалу без пор у відносних одиницях відповідно до залежності (12) з врахуванням часової затримки хвиль в середовищах складових матеріалу та представимо її так:

$$\begin{aligned} A_W(t') = & 2 \left(\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \cdot \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \right) \times \\ & \times \sum_{N=0}^{\infty} \left(1 - \left(1 - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \cdot \frac{Z_3 - Z_4}{Z_3 + Z_4} \right) \left(1 + \frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) \left(1 + \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2} \right) \right)^N \times \\ & \times \cos \left(\omega_0 \left(\frac{(h_1 + h_2)}{c_{23}} b(2N + 1) - t \right) \right) \times \\ & \times \exp \left(- \frac{\left(\frac{(h_1 + h_2)}{c_{23}} b(2N + 1) - t \right)^2}{\left(\frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \alpha_3 \cdot (2N + 1)(h_1 + h_2) \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Фазовий зсув ультразвукового імпульсного сигналу, що пройшов контрольований двошаровий матеріал без пор, можна подати у вигляді:

$$\varphi_W = \operatorname{arctg} \frac{\sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \exp(Y) \sin \left(\omega_0 \left(\frac{h_1 + h_2}{c_{23}} b(2N+1) - t \right) \right)}{\sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \exp(Y) \cos \left(\omega_0 \left(\frac{h_1 + h_2}{c_{23}} b(2N+1) - t \right) \right)}, \quad (14)$$

де

$$V_L = 1 - \left(1 - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \cdot \frac{Z_3 - Z_4}{Z_3 + Z_4} \right) \left(1 + \frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) \left(1 + \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2} \right),$$

$$Y = - \frac{\left(\frac{h_1 + h_2}{c_{23}} b(2N+1) - t \right)^2}{\left(\frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \alpha_3 \cdot (2N+1)(h_1 + h_2).$$

Якщо в двошаровому матеріалі (див. рис. 1,б) наявні пори (за їх загальний об'єм та форму відповідає величина $\cos \nu$, де ν – кут між напрямом розповсюдження ультразвукових хвиль, які проходять крізь пори, і поверхнею двошарового матеріалу), то вираз (13) можна подати наступним чином:

$$A_{Wp}(t') = 2 \left(\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \cdot \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \right) \times$$

$$\times \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \cos \left(\omega_0 \left(\frac{h_1 + h_2}{c_{23}} \cos \nu b(2N+1) - t \right) \right) \times \quad (15)$$

$$\times \exp \left(- \frac{\left(\frac{h_1 + h_2}{c_{23}} \cos \nu b(2N+1) - t \right)^2}{\left(\frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \alpha_3 \cdot (2N+1)(h_1 + h_2) \cos \nu \right).$$

Фазовий зсув такого ультразвукового імпульсного сигналу, що пройшов контрольований двошаровий матеріал з порами, можна показати у вигляді:

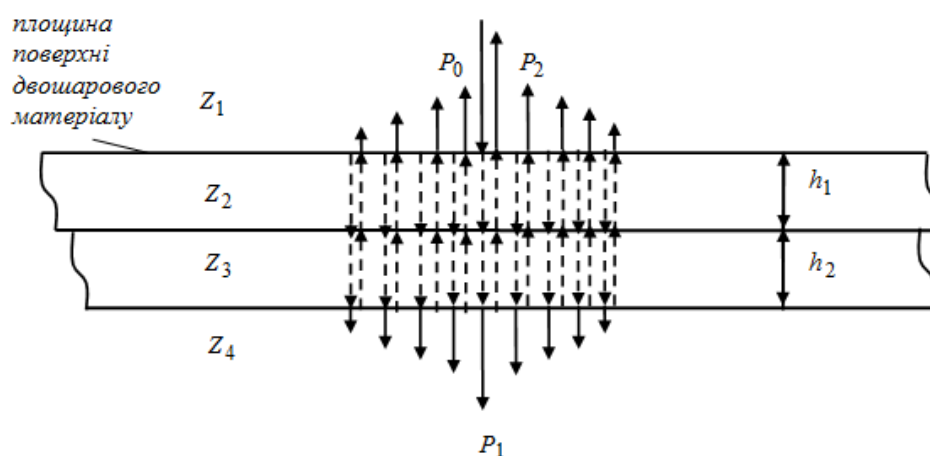
$$\varphi_{Wp} = \operatorname{arctg} \frac{\sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \exp(Y_V) \sin \left(\omega_0 \left(\frac{h_1 + h_2}{c_{23}} \cos \nu b(2N+1) - t \right) \right)}{\sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \exp(Y_V) \cos \left(\omega_0 \left(\frac{h_1 + h_2}{c_{23}} \cos \nu b(2N+1) - t \right) \right)}, \quad (16)$$

де

$$Y_V = - \frac{\left(\frac{(h_1 + h_2) \cos \nu}{c_{23}} b(2N + 1) - t \right)^2}{\left(\frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \alpha_3 \cdot (2N + 1)(h_1 + h_2) \cos \nu.$$

За допомогою ультразвукових хвиль, які проходять крізь двошаровий композитний матеріал з порами та без них, можна контролювати його товщину, а ще, знаючи його об'ємну щільність, за цими параметрами можна визначати його поверхневу щільність, якщо структура самого матеріалу однорідна та суцільна. Товщина матеріалу повинна бути такою, щоб ультразвукові хвилі могли проходити крізь нього з амплітудою, яка дозволить зафіксувати вимірювальний сигнал детектором. Тому доцільно за допомогою такого методу контролювати двошарові матеріали з малою товщиною. Якщо в матеріалі з'являються наскрізні пори та збільшується його товщина, більша частина ультразвукових хвиль проходить крізь повітря в наскрізних порах. Тому на результуючий сигнал амплітуди хвиль на детекторі впливають саме пори. При збільшенні кількості шарів матеріалу з порами, крізь який проходять ультразвукові хвилі, може відбуватися явище внутрішнього розсіювання енергії коливань (залежить від товщини пакету матеріалу та від розміру пор кожного шару). Враховуючи наведене вище, необхідно вибирати двошарові матеріали з малою товщиною для контролю їхніх технологічних параметрів за допомогою безконтактних ультразвукових датчиків. Також необхідно додатково визначати розміри самих пор матеріалу та враховувати їх при розрахунках технологічних параметрів різних матеріалів із складною структурою.

Параметри зміни амплітуди AW_0 падаючих ультразвукових хвиль та зміни амплітуди AW_p коливань у часі, що пройшли матеріал, а також значень амплітудних співвідношень $|W_p|$ від товщини h матеріалу з порами при $\cos \nu = 0,002$ продемонстровано на рис. 2.



а

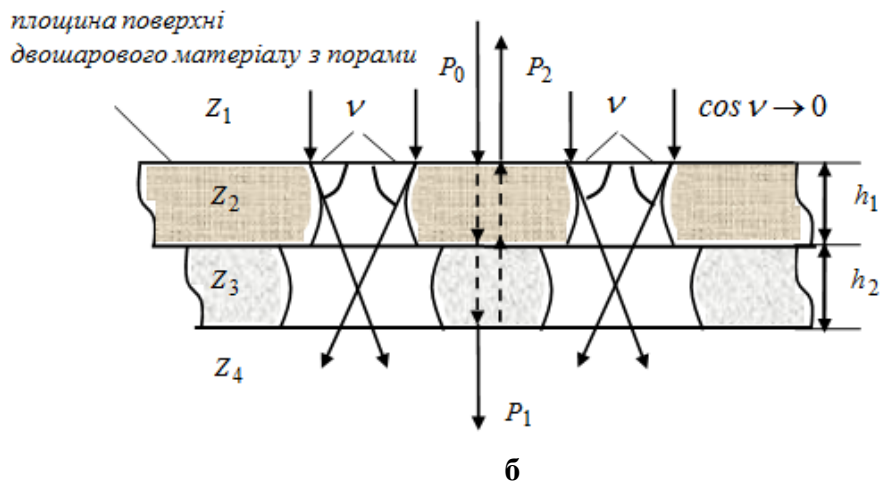
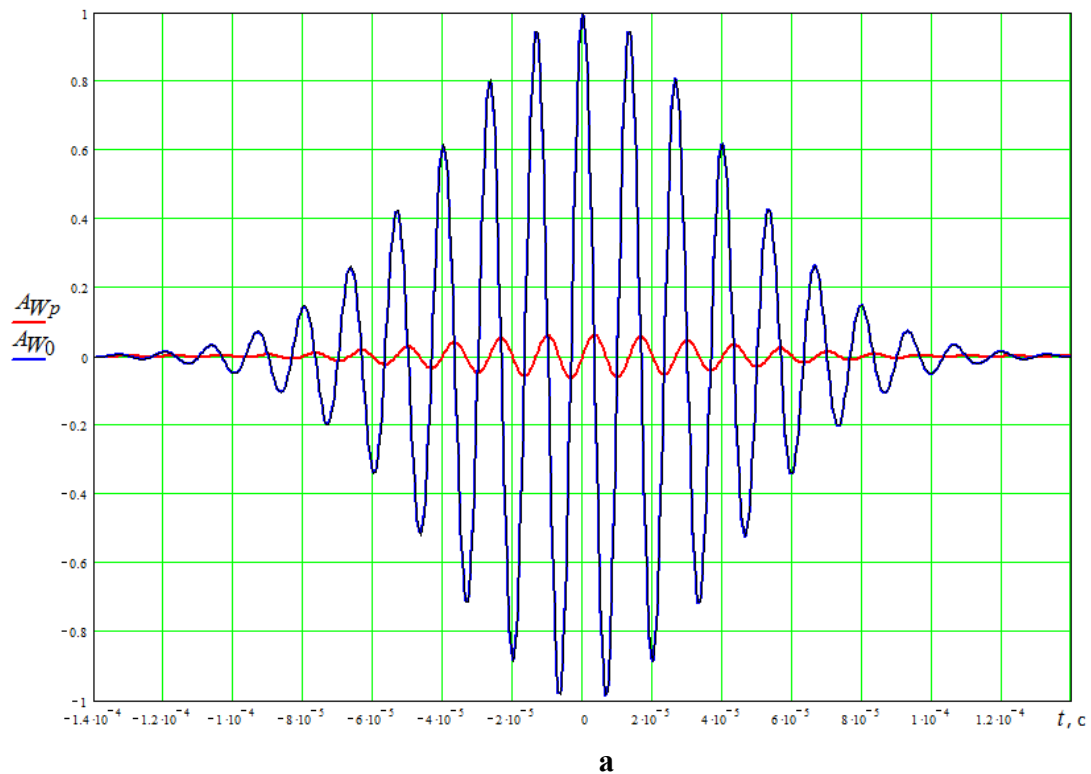
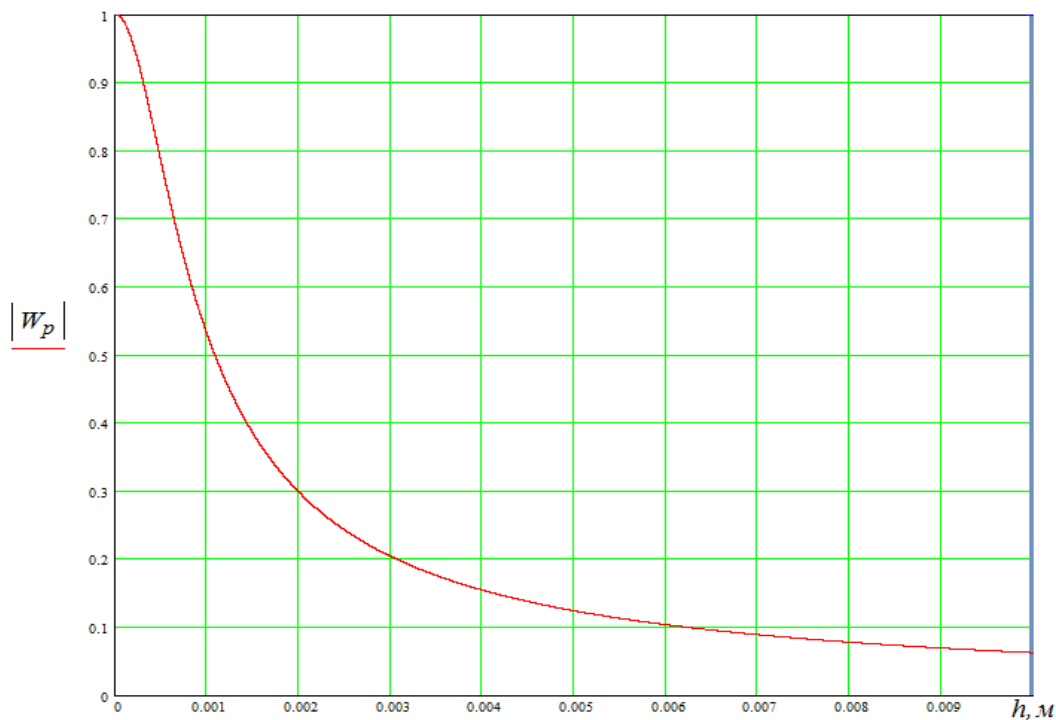


Рис. 1. Проходження ультразвукових хвиль крізь різні матеріали:
 а – двошаровий матеріал без пор;
 б – двошаровий матеріал з наскрізними порами





б

Рис. 2. Зміна амплітуд хвиль A_{W0} , A_{Wp} у часі, що проходять матеріал з порами, та залежність зміни

модулю $|W_p|$ від товщини h матеріалу:

а – зміна амплітуд A_{W0} , A_{Wp} хвиль у часі для матеріалу з $h = 1\text{см}$, $\cos V = 0,002$;

б – залежність зміни модуля $|W_p|$ хвиль від товщини h матеріалу з порами при $\cos V = 0,002$

Згасання ультразвукових хвиль може впливати на їхні амплітудні співвідношення при проходженні контрольованих матеріалів без пор. Це також вплине на точність приладів, побудова яких базуватиметься на залежностях взаємодії ультразвукових хвиль із складною структурою різних композитних матеріалів з мінімальними порами, тому це потрібно враховувати.

Висновки. Проведений аналіз показав, що отримані вирази для імпульсних ультразвукових сигналів, які можуть взаємодіяти з пористими матеріалами, можна використати для створення нових методів та засобів неруйнівного безконтактного контролю технологічних параметрів матеріалів із складною структурою. Було розглянуто матеріал із товщиною $h = 1\text{см}$ та із порами, при яких параметр для зондуючих хвиль $\cos V = 0,002$. Показано, що при наявності наскрізних пор в матеріалі із двома різними шарами амплітуда хвиль згасає набагато менше, ніж для повністю суцільних матеріалів за своєю структурою. Це дозволить використовувати малопотужні датчики для контролю таких матеріалів із збільшенням їх чутливості за зміною амплітуди хвиль, які ними приймаються. Також графічно наведено пакети ультразвукових хвиль падаючого імпульсного сигналу та сигналу, що пройшов матеріал з врахуванням фазового зсуву, які, у свою чергу, побудовані за отриманими в роботі виразами. Такі моделі допоможуть змодельовати взаємодію ультразвукових хвиль з різними двошаровими матеріалами з порами та без них. Зазначене

дозволить створювати складні у комплексі та універсальні прилади безконтактного контролю різних технологічних параметрів для пористих матеріалів широкого вжитку у вітчизняній промисловості.

Література

1. Ермолов И. Н. Методы и средства неразрушающего контроля качества / И.Н. Ермолов, Ю.Я. Останин. — М.: Высшая школа, 1988. — 368 с.
2. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских. — М.: Наука, — 1973. — 343 с.
3. Костюков А.Ф. Модель регистрации признаков многослойной структуры с помощью колебаний / А.Ф. Костюков // Вестник АГАУ. — 2010. — № 3. — С. 94—98.
4. Костюков А.Ф. Метод контроля технологических параметров сельскохозяйственных волокон с помощью ультразвука / А.Ф. Костюков // Вестник АГАУ. — 2013. — № 1. — С. 96—99.
5. Кандрин Ю.В. Скорость распространения ультразвуковых колебаний в волоконной среде / Ю.В. Кандрин, О.В. Цымбалист, Н.П. Воробьев // Вестник АГАУ. — 2011. — № 1. — С. 95—98.
6. Здоренко В.Г. Дослідження проходження імпульсного ультразвукового сигналу крізь тканину при контролі поверхневої щільності / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко // Вісник ХНУ. — 2013. — №3. — С. 90—96.
7. Здоренко В.Г. Технологічний контроль текстильних матеріалів / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко, О.В. Барилко // Метрологія та прилади. — 2017. — №5. — С. 86 — 88.
8. Здоренко В.Г. Технологічний контроль пористості текстильних матеріалів із складною структурою / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко, А.С. Дяченко // Вісник Херсонського національного технічного університету. — 2017. — №1. — С. 105 — 112.
9. Здоренко В.Г. Дослідження застосування ультразвукового безконтактного методу визначення технологічних параметрів для процесу ткацтва / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко, О.В. Барилко, С.М. Лісовець, Т.В. Лебедюк // Вісник ХНТУ. — 2018. — №4(67). — С. 152 — 161.

References

1. Ermolov, I. N., & Ostanin, Yu. A. (1988). *Metody i sredstva nerazrushayushogo kontrolya kachestva* [Methods and tools for not eroding quality control]. Moscow: Vysshaya shkola [In Russian].
2. Brekhovskikh, L.M. (1973). *Volny v sloistyh sredah* [The waves in layered medium]. Moscow: Nauka [In Russian].
3. Kostukov, A.F. (2010). Model registracii priznakov mnogoslojnoj struktury s pomoshyu kolebanij [The Registration Model of features of the multilayer structure using acoustic oscillations]. *Vestnik AGAU. — Bulletin of Altai State Agricultural University*, 3, 94 — 98 [In Russian].
4. Kostukov, A.F. (2013). Metod kontrolya tehnologicheskikh parametrov selskohozyajstvennyh volokon s pomoshyu ultrazvuka [The method of monitoring the technological parameters of agricultural fibers using ultrasound]. *Vestnik AGAU. — Bulletin of Altai State Agricultural University*, 1, 96 — 99 [In Russian].
5. Kandrin, Yu.V., Tsymbalist O.V., & Vorobiev N.P. (2011). Skorost rasprostraneniya ultrazvukovyh kolebanij v volokonnoj srede [The propagation velocity of ultrasonic vibrations in a fiber medium]. *Vestnik AGAU. — Bulletin of Altai State Agricultural University*, 1, 95 — 98 [In Russian].
6. Zdorenko, V.G., & Barylko, S.V. (2013). Doslidzhennya prohodzhennya impulsnogo ultrazvukovogo signalu kriz tkaninu pri kontroli poverhnevoyi shilnosti [Research of ultrasonic passing of pulsed signal through the fabric during the control of basis weight]. *Visnik KhNU. — Herald of Khmelnytskyi national university*, 3, 90 — 96 [In Ukrainian].
7. Zdorenko, V.G., & Barylko, S.V. (2017). Tehnologichnij kontrol tekstilnih materialiv [Technological control of textile materials]. *Metrologiya ta priladi. — Metrology and instruments*, 5, 86 — 88 [In Ukrainian].
8. Zdorenko, V.G., Barylko, S.V., & Dyachenko A.S. (2017). Tehnologichnij kontrol poristosti tekstilnih materialiv iz skladnoyu strukturoyu [Technological control of porosity of textile materials with complex structure]. *Visnik KhNTU. — Visnyk of Kherson National Technical University*, 1, 105 — 112 [In Ukrainian].
9. Zdorenko, V.G., Barylko, O.V., Barylko, S.V., Lisovets S.N., & Lebedyuk T.V. (2018). Doslidzhennya zastosuvannya ultrazvukovogo bezkontaktного методу viznachennya tehnologichnih parametriv dlya procesu tkactva [Investigation of the use of ultrasonic non-contact method for determining technological parameters for the weaving process]. *Visnik KhNTU. — Visnyk of Kherson National Technical University*, 4, 152 — 161 [In Ukrainian].
10. Zdorenko, V.G., & Barylko, S.V. (2013). Kontrol

10.Здоренко В.Г. Контроль технологічних параметрів тканини за допомогою ультразвукового адаптивного пристрою / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – №3. – С. 7 – 11.

tehnologichnih parametriv tkanini za dopomogoyu ultrazvukovogo adaptivnogo pristroyu [Control of the technological parameters of the fabric with the ultrasonic adaptive device]. Visnik Vinnickogo politehnicnogo institutu. — Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute, 3, 7 — 11 [In Ukrainian].

BARYLKO S.

poo4ta@bigmir.net

ORCID: 0000-0002-2785-5784

Kyiv National University of Technologies and Design

LISOVETS S.

ser.lis.290171@gmail.com

ORCID: 0000-0003-3643-046X

Kyiv National University of Technologies and Design

ZDORENKO V.

alzd123@meta.ua

ORCID: 0000-0001-6508-4290

Kyiv National University of Technologies and Design

SHIPKO D.

kaks@knuud.com.ua

Kyiv National University of Technologies and Design

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН СКВОЗЬ ДВУХСЛОЙНЫЙ МАТЕРИАЛ СО СЛОЖНОЙ СТРУКТУРОЙ ПРИ КОНТРОЛЕ ЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

ЗДОРЕНКО В. Г., БАРЫЛКО С. В. ЛИСОВЕЦ С. Н., ШИПКО Д. А.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Исследовать прохождения ультразвуковых волн через двухслойный материал со сложной структурой при бесконтактном контроле его технологических параметров.

Методика. В работе использован бесконтактный ультразвуковой метод контроля технологических параметров материалов со сложной структурой, который учитывает затухание ультразвуковых волн.

Результаты. Обосновано, что затуханием ультразвукового сигнала для материала со значительными порами при поперечном его зондировании можно пренебречь по сравнению с затуханием в материале без сквозных пор. Приведены результаты исследований влияния толщины материала с порами на амплитудные соотношения ультразвуковых волн.

Научная новизна. Получены зависимости амплитуд ультразвуковых волн, одна из которых проходит через двухслойный сплошной материал, а другая проходит двухслойный материал с порами, с учетом зависимости их затухания от толщины материала. В работе получены зависимости фазового сдвига ультразвуковых волн, которые отразились от двухслойного материала без пор, и волн, отразившихся от двухслойного материала с порами, от общей толщины контролируемого материала, если сравнивать фазу этих волн с падающими колебаниями. Также получены зависимости изменения амплитуд волн во времени для импульсного ультразвукового сигнала, проходящего через контролируемый материал.

Практическая значимость. Предложено использовать импульсный ультразвуковой сигнал для оперативного бесконтактного контроля технологических параметров двухслойных материалов со сложной структурой. Проведенный анализ показал, что полученные выражения для импульсных ультразвуковых сигналов, которые могут взаимодействовать с пористыми материалами, можно использовать для создания новых методов и средств неразрушающего бесконтактного контроля технологических параметров материалов со сложной структурой. Указанное позволит создавать сложные в комплексе и универсальные приборы бесконтактного контроля различных технологических параметров для композитных материалов с порами, которые сегодня подвергаются только контактному разрушительному контролю, что не позволяет вести оперативный мониторинг непосредственно на производстве.

Ключевые слова: двухслойный материал, поры, ультразвуковые волны, затухание, амплитудные соотношения волн, технологические параметры, бесконтактный контроль.

RESEARCH OF THE PASSAGE OF ULTRASONIC WAVES THROUGH A TWO-LAYERED MATERIAL WITH COMPLEX STRUCTURE AT THE CONTROL OF ITS TECHNOLOGICAL PARAMETERS

ZDORENKO V. G., BARYLKO S. V., LISOVETS S. N., SHIPKO D. A.

Kyiv National University of Technologies & Design

Purpose. Investigate the passage of ultrasonic waves through a two-layer material with a complex structure with non-contact control of its technological parameters.

Methodology. A non-contact ultrasonic method was used in the work to control technological parameters of materials with a complex structure, which takes into account the attenuation of ultrasonic waves.

Findings. It is substantiated that the attenuation of an ultrasonic signal for a material with significant pores during its transverse sounding can be neglected compared to attenuation in a material without through pores. The results of studies of the influence of the thickness of a material with pores on the amplitude ratios of ultrasonic waves are presented.

Originality. The dependences of the amplitudes of ultrasonic waves are obtained, one of which passes through a two-layer continuous material, and the other passes through a two-layer material with pores, taking into account the dependence of their attenuation on the thickness of the material. In this work, we obtained the dependences of the phase shift of ultrasonic waves, which were reflected from a two-layer material without pores, and waves reflected from a two-layer material with pores, on the total thickness of the controlled material, if we compare the phase of these waves with incident vibrations. Also obtained are the dependences of the change in wave amplitudes over time for a pulsed ultrasonic signal passing through a controlled material.

Practical value. It is proposed to use a pulsed ultrasonic signal for operational non-contact control of technological parameters of bilayer materials with a complex structure. The analysis showed that the obtained expressions for pulsed ultrasonic signals that can interact with porous materials can be used to create new methods and means of non-destructive non-contact control of technological parameters of materials with a complex structure. The aforementioned will make it possible to create complex integrated and universal contactless control devices for various technological parameters for composite materials with pores, which today are subjected only to destructive contact control, which does not allow operational monitoring directly at the plant.

Keywords: two-layer material, pores, ultrasonic waves, attenuation, amplitude ratios of waves, technological parameters, contactless control.