

УДК 677.017

**ЗДОРЕНКО В. Г., БАРИЛКО С. В., ЛІСОВЕЦЬ С. М.,
ШИПКО Д. О.**

Київський національний університет технологій та дизайну

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЗГАСАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ ПРИ
ЇХ ПРОХОДЖЕННІ ТА ВІДБИТТІ ВІД ОДНОШАРОВИХ
МАТЕРІАЛІВ З ПОРАМИ РІЗНОГО РОЗМІРУ**

Мета. Дослідити як змінюється згасання ультразвукових хвиль у різних одношарових матеріалах з наявними порами різного розміру. Зазначене необхідне для можливості створення безконтактних засобів ультразвукового контролю таких матеріалів.

Методика. У роботі для аналізу процесу взаємодії ультразвукових хвиль з одношаровими матеріалами з різними порами та для аналізу зміни амплітудного згасання зонduючих коливань використовувався метод визначення відносної зміни цього параметру з врахуванням товщини або поверхневої густини матеріалу.

Результати. Наведено вирази для модулів комплексного коефіцієнту проходження та відбиття ультразвукових хвиль від одношарових матеріалів з малими порами, а також від текстильних одношарових матеріалів із наскрізними порами, крізь які проходить більша частина коливань. Приведені залежності відносних змін амплітудних згасань хвиль від частоти коливань, товщини та поверхневої густини матеріалу. Показано, що згасання амплітуди ультразвукових хвиль, які взаємодіють з одношаровими матеріалами з малими порами, та згасання коливань для одношарових текстильних полотен можуть сильно відрізнятися одне від одного. Ця різниця спричинена огинанням частини звукових хвиль самих волокон текстильних полотен з наскрізними порами при взаємодії з ними зонduючих коливань.

Наукова новизна. Отримано залежності відносних змін різниці модулів з врахуванням згасання та без нього для комплексних коефіцієнтів відбиття та проходження ультразвукових хвиль. Зазначені коливання, що взаємодіють з одношаровими матеріалами з різними порами, розглядаються з врахуванням частоти ультразвукових хвиль, розмірів пор, товщини або поверхневої густини самого матеріалу.

Практична значимість. Отримані залежності для визначення згасання амплітуди зонduючих ультразвукових хвиль від структури, пористості матеріалу, його товщини або поверхневої густини. Це дасть можливість створювати безконтактні засоби контролю для матеріалів із складною внутрішньою структурою та налаштовувати їх в автоматичному режимі на зміну розмірів пор, що може суттєво впливати на похибки таких приладів. На точність приладів, які будуть налаштовуватися на складну структуру контрольованого одношарового матеріалу, буде впливати саме параметр згасання зонduючих коливань. У майбутньому цей напрямок досліджень дозволить створювати безконтактні методи та засоби контролю технологічних параметрів різних одношарових матеріалів та інтегрувати такі прилади та системи безпосередньо у виробничий процес.

Ключові слова: одношаровий матеріал з малими порами, модулі комплексних коефіцієнтів проходження та відбиття хвиль, текстильний одношаровий матеріал, відносна зміна амплітуд зонduючих коливань, згасання ультразвукових хвиль.

Вступ. Для багатьох засобів неруйнівного контролю, який базується на інформативних параметрах ультразвукових хвиль [1-3], важливим є точність та мобільність цих приладів, що застосовуються для його реалізації. Особливо це стосується безконтактних засобів контролю, точність яких забезпечується додержанням їхньої похибки в допустимих межах, на яку може впливати багато факторів [4-10], одним із яких є згасання зонduючих хвиль в контрольованому матеріалі. Визначення цього параметру є досить актуальним

завданням для можливості розробки нових методів та засобів безконтактного ультразвукового контролю одношарових матеріалів із складною структурою та різною пористістю.

Постановка завдання. Для одношарових полотен, що в основному виробляються вітчизняними текстильними підприємствами, згасання ультразвукових хвиль, які можуть застосовуватися для поперечного прозвучування такого текстилю, буде незначним. Це можна пояснити тим, що хоча згасання амплітуди хвиль в самих волокнах текстильних матеріалів може бути $\alpha_z = 15 \cdot m^{-1}$, але зважаючи на те, що більша частина коливань огинає нитки з волокнами текстильного матеріалу і проходить крізь наскрізні пори, то цим згасанням для результуючого ультразвукового сигналу можна знехтувати. Тому пік згасання амплітуди ультразвукових хвиль, що взаємодіють з одношаровими текстильними матеріалами, припадає на пологу частину залежностей модулів $|W|$, $|V|$ для текстильних матеріалів в діапазоні амплітуд хвиль, який підходить для контролю полотен. Таке згасання мало впливає на зміну амплітуд хвиль, яка не перевищує 1% за модулем для текстильних полотен. Разом з тим згасання для одношарових полімерних матеріалів з малими порами може суттєво впливати на зміну амплітуд хвиль, яка може перевищувати 60 % за модулем. Для уточнення цих показників, які стосуються згасання амплітуд зондуючих хвиль та можуть впливати на точність показів вимірювальних приладів при контролі одношарових пористих матеріалів, необхідно провести додаткові дослідження для встановлення граничних їх значень при взаємодії коливань з матеріалами з різною пористістю.

Результати дослідження. Дослідження згасання імпульсного ультразвукового сигналу при проходженні та відбитті хвиль під час їхньої взаємодії з різними контрольованими матеріалами є важливою задачею, вирішення якої дозволить поліпшити методи та точність безконтактних приладів, які застосовуватимуть для визначення основних технологічних параметрів композитних та текстильних матеріалів.

Для того, щоб провести детальний аналіз впливу згасання на амплітудні співвідношення ультразвукових хвиль, що пройшли одношаровий матеріал з порами, до хвиль, які тільки падають на нього, потрібно спочатку представити комплексний коефіцієнт проходження коливань $W_p(\omega)$ у загальному його виді:

$$W_p(\omega) = \operatorname{Re} W_p(\omega) + j \operatorname{Im} W_p(\omega), \quad (1)$$

де $\operatorname{Re} W_p(\omega)$, $\operatorname{Im} W_p(\omega)$ – дійсна та уявна частини комплексного коефіцієнту проходження ультразвукових хвиль крізь матеріал. Для знаходження такої залежності амплітудних співвідношень хвиль від колової частоти ω з врахуванням згасання α_z для одношарового матеріалу з наскрізними порами, які можна охарактеризувати за допомогою параметру $\cos \nu$, що відображає проходження частини звукової енергії через пори, треба записати модуль $|W_p(\omega)|$ для такого матеріалу у вигляді:

$$|W_p(\omega)| = \sqrt{\operatorname{Re} W_p(\omega)^2 + \operatorname{Im} W_p(\omega)^2}, \quad (2)$$

або

$$\begin{aligned}
 |W_p(\omega)| = & \left(\left(\frac{4Z_1Z_2}{(Z_1+Z_2)^2} \right)^2 \cdot \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2-Z_1}{Z_1+Z_2} \right)^{2N} \cdot \cos \left((2N+1) \frac{\omega b h_1 \cos \nu}{c_2} \right) \times \right. \right. \\
 & \left. \times e^{-\alpha_3 \cdot (2N+1) h_1 \cos \nu} \right)^2 + \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2-Z_1}{Z_1+Z_2} \right)^{2N} \cdot \sin \left((2N+1) \frac{\omega b h_1 \cos \nu}{c_2} \right) \times \right. \\
 & \left. \left. \times e^{-\alpha_3 \cdot (2N+1) h_1 \cos \nu} \right)^2 \right) \left. \right)^{\frac{1}{2}},
 \end{aligned} \tag{3}$$

де Z_1 – акустичний опір повітря; Z_2 – акустичний опір одношарового матеріалу з порами; N – кількість перевідбивань хвиль, що дорівнює 0, 1, 2, 3, ..., ∞ ; α_3 – загальний коефіцієнт згасання ультразвукових хвиль у матеріалі; h_1 – товщина одношарового матеріалу, що контролюється; c_2 – швидкість розповсюдження ультразвукової хвилі в одношаровому контрольованому матеріалі; $b = \omega / \omega_0$ – коефіцієнт відношення несучої колової частоти та колової частоти заповнення імпульсного сигналу; ν – кут між напрямом розповсюдження ультразвукових хвиль, які проходять крізь пори, і поверхнею одношарового матеріалу.

Якщо записувати модуль комплексного коефіцієнта проходження $|W_{\alpha\beta}(\omega)|$ для одношарової тканини з деформацією ниток та з різною фазовою будовою із умовною товщиною, яку можна представити сумою діаметру нитки основи та утку d_{oy} , то його можна показати у такому вигляді:

$$\begin{aligned}
 |W_{\alpha\beta}(\omega)| = & \left(\left(\frac{4Z_1Z_2}{(Z_1+Z_2)^2} \right)^2 \cdot \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2-Z_1}{Z_1+Z_2} \right)^{2N} \cdot \cos \left((2N+1) \frac{\omega b \pi d_{oy} \cos \nu}{4c_2} \right) \times \right. \right. \\
 & \left. \left. \times e^{-\alpha_3 \cdot (2N+1) \frac{\pi d_{oy} \cos \nu}{4}} \right)^2 + \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2-Z_1}{Z_1+Z_2} \right)^{2N} \cdot \sin \left((2N+1) \frac{\omega b \pi d_{oy} \cos \nu}{4c_2} \right) \times \right. \right. \\
 & \left. \left. \times e^{-\alpha_3 \cdot (2N+1) \frac{\pi d_{oy} \cos \nu}{4}} \right)^2 \right) \left. \right)^{\frac{1}{2}}.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Вираз (4), пов'язавши його з поверхневою густиною m_s самого текстильного полотна, можна подати як:

$$\begin{aligned}
 |W_{\alpha\beta}(\omega)| = & \left(\left(\frac{4Z_1Z_2}{(Z_1+Z_2)^2} \right)^2 \cdot \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2-Z_1}{Z_1+Z_2} \right)^{2N} \cdot \cos \left((2N+1) \frac{K m_s \omega b \cos v}{\pi Z_2} \right) \times \right. \right. \\
 & \left. \left. \times e^{-\alpha_3 (2N+1) \frac{K m_s \cos v}{\pi \rho_2}} \right)^2 + \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2-Z_1}{Z_1+Z_2} \right)^{2N} \cdot \sin \left((2N+1) \frac{K m_s \omega b \cos v}{\pi Z_2} \right) \times \right. \right. \\
 & \left. \left. \times e^{-\alpha_3 (2N+1) \frac{K m_s \cos v}{\pi \rho_2}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Отримавши залежності співвідношень амплітуд ультразвукових хвиль, однієї, яка пройшла одношаровий матеріал, до іншої, що тільки падає на його поверхню, покажемо аналогічні вирази для співвідношень амплітуд відбитих коливань. Ці співвідношення амплітуд ультразвукових хвиль пропорційні модулям $|V_p(\omega)|$, $|V_{\alpha\beta}(\omega)|$. Для того, щоб провести детальний аналіз впливу згасання на амплітудні співвідношення ультразвукових хвиль, що відбилися від одношарового матеріалу, до хвиль, які тільки падають на нього, потрібно спочатку комплексний коефіцієнт відбиття коливань $V_p(\omega)$ показати у загальному вигляді з дійсною $ReV_p(\omega)$ та уявною $ImV_p(\omega)$ його частинами так:

$$V_p(\omega) = ReV_p(\omega) + j ImV_p(\omega). \tag{6}$$

Покажемо залежність амплітудного співвідношення хвиль від їхньої колової частоти ω з врахуванням згасання α_3 для одношарового матеріалу з наскрізними порами, яке пропорційне модулю $|V_p(\omega)|$, який у загальному вигляді можна представити як:

$$|V_p(\omega)| = \sqrt{ReV_p(\omega)^2 + ImV_p(\omega)^2}, \tag{7}$$

або

$$\begin{aligned}
 |V_p(\omega)| = & \left(\left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \cdot \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \left(\cos \left(2N \frac{\omega b h_1 \cos v}{c_2} \right) \times \right. \right. \right. \\
 & \times e^{-\alpha_3 \cdot 2N h_1 \cos v} - \cos \left((2N + 2) \frac{\omega b h_1 \cos v}{c_2} \right) \cdot e^{-\alpha_3 \cdot (2N + 2) h_1 \cos v} \left. \left. \left. \right) \right)^2 + \right. \\
 & + \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \left(\sin \left(2N \frac{\omega b h_1 \cos v}{c_2} \right) \cdot e^{-\alpha_3 \cdot 2N h_1 \cos v} - \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. - \sin \left((2N + 2) \frac{\omega b h_1 \cos v}{c_2} \right) \cdot e^{-\alpha_3 \cdot (2N + 2) h_1 \cos v} \right) \right) \right)^2 \left. \right) \frac{1}{2}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Якщо показати модуль комплексного коефіцієнта відбиття $|V_{\alpha\beta}(\omega)|$ для одношарової тканини із середньою умовною її товщиною d_{oy} , то його можна подати у такому вигляді:

$$\begin{aligned}
 |V_{\alpha\beta}(\omega)| = & \left(\left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \cdot \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \left(\cos \left(2N \frac{\omega b \pi d_{oy} \cos v}{4 c_2} \right) \times \right. \right. \right. \\
 & \times e^{-\alpha_3 \cdot 2N \frac{\pi d_{oy} \cos v}{4}} - \cos \left((2N + 2) \frac{\omega b \pi d_{oy} \cos v}{4 c_2} \right) \cdot e^{-\alpha_3 \cdot (2N + 2) \frac{\pi d_{oy} \cos v}{4}} \left. \left. \left. \right) \right)^2 + \right. \\
 & + \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \left(\sin \left(2N \frac{\omega b \pi d_{oy} \cos v}{4 c_2} \right) \cdot e^{-\alpha_3 \cdot 2N \frac{\pi d_{oy} \cos v}{4}} - \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. - \sin \left((2N + 2) \frac{\omega b \pi d_{oy} \cos v}{4 c_2} \right) \cdot e^{-\alpha_3 \cdot (2N + 2) \frac{\pi d_{oy} \cos v}{4}} \right) \right) \right)^2 \left. \right) \frac{1}{2}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Вираз (9) можна пов'язати з поверхневою густиною m_s самого текстильного полотна та показати як:

$$\begin{aligned}
 |V_{\alpha\beta}(\omega)| = & \left(\left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \cdot \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \left(\cos \left(2N \frac{K m_s \omega b \cos \nu}{\pi Z_2} \right) \times \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. \times e^{-\alpha_3 \cdot 2N \frac{K m_s \cos \nu}{\pi \rho_2}} - \cos \left((2N+2) \frac{K m_s \omega b \cos \nu}{\pi Z_2} \right) \cdot e^{-\alpha_3 \cdot (2N+2) \frac{K m_s \cos \nu}{\pi \rho_2}} \right) \right)^2 + \right. \\
 & \left. + \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \left(\sin \left(2N \frac{K m_s \omega b \cos \nu}{\pi Z_2} \right) \cdot e^{-\alpha_3 \cdot 2N \frac{K m_s \cos \nu}{\pi \rho_2}} - \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. - \sin \left((2N+2) \frac{K m_s \omega b \cos \nu}{\pi Z_2} \right) \cdot e^{-\alpha_3 \cdot (2N+2) \frac{K m_s \cos \nu}{\pi \rho_2}} \right) \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Отже, в роботі наведені вирази з врахуванням згасання для амплітудних співвідношень ультразвукових хвиль, що пройшли матеріал, до хвиль, які падають на нього, а також залежності співвідношень хвиль, які відбилися від матеріалу, до падаючих на нього коливань відповідно. Це дасть змогу проаналізувати амплітудні відносні зміни, викликані згасанням хвиль. Вплив цього згасання можна побачити за допомогою параметру амплітудної похибки (відносної зміни їх амплітуд), що спричинена ним.

У загальному вигляді ці відносні зміни для амплітуд хвиль, що пройшли крізь матеріал, та для амплітуд хвиль, які відбилися від матеріалу, можна представити так:

$$\delta |W(\omega)| = \frac{|W(\omega)| - |W(\omega)|_0}{|W(\omega)|_0} \cdot 100\%, \tag{11}$$

та

$$\delta |V(\omega)| = \frac{|V(\omega)| - |V(\omega)|_0}{|V(\omega)|_0} \cdot 100\%, \tag{12}$$

де $\delta |W(\omega)|$ – відносна зміна модуля комплексного коефіцієнту проходження ультразвукових хвиль, яка спричинена згасанням; $\delta |V(\omega)|$ – відносна зміна модуля комплексного коефіцієнту відбиття ультразвукових хвиль, яка спричинена згасанням; $|W(\omega)|_0$, $|V(\omega)|_0$ – модулі комплексних коефіцієнтів проходження та відбиття без врахування згасання хвиль в матеріалі ($\alpha_3 = 0$).

Приведемо два випадки відносних змін амплітуд хвиль (для різних за структурою матеріалів), використовуючи отриманні вирази для модулів комплексних коефіцієнтів проходження та відбиття коливань. Позначення самих модулів $|W(\omega)|$ та $|V(\omega)|$ відповідних

коефіцієнтів із переходом запису колової частоти ω до f покажемо просто як $|W|$ і $|V|$, а величини $\delta |W(\omega)|$, $\delta |V(\omega)|$ подамо як $\delta |W|$ і $\delta |V|$.

Відносні зміни амплітуд хвиль, що спричиняються згасанням сигналів для одношарових матеріалів з порами, після спрощення складових виразів із переходом від колової частоти ω до f можна подати так:

$$\delta |W| = \left(|W| \sqrt{1 + \left(\frac{\pi f \rho_2 h_1 \cos v}{Z_1} \right)^2} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (13)$$

$$\delta |V| = \left(|V| \sqrt{1 + \left(\frac{Z_1}{\pi f \rho_2 h_1 \cos v} \right)^2} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (14)$$

Відносні зміни амплітуд хвиль, що спричиняються згасанням сигналів для тканин, які пов'язані з умовною товщиною d_{oy} , після спрощення складових виразів із переходом від колової частоти ω до f можна подати так:

$$\delta |W| = \left(|W| \sqrt{1 + \left(\frac{\pi^2 f \rho_2 d_{oy} \cos v}{4 Z_1} \right)^2} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (15)$$

$$\delta |V| = \left(|V| \sqrt{1 + \left(\frac{4 Z_1}{\pi^2 f \rho_2 d_{oy} \cos v} \right)^2} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (16)$$

Відносні зміни амплітуд хвиль, що спричиняються згасанням сигналів, для текстильних полотен, враховуючи залежності (15) та (16), пов'язавши їх з поверхневою густиною m_s , після їх спрощення можна подати так:

$$\delta |W| = \left(|W| \sqrt{1 + \left(\frac{K m_s f \cos v}{Z_1} \right)^2} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (17)$$

та

$$\delta |V| = \left(|V| \sqrt{1 + \left(\frac{Z_1}{K m_s f \cos v} \right)^2} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (18)$$

На рис.1 показано як впливає параметр згасання α_3 (за екстремумами поверхні при $\alpha_3 = 0$ та $\alpha_3 = 15 \text{ м}^{-1}$) ультразвукових хвиль на їхні відносні похибки для амплітудних

співвідношень, які пропорційні модулям $|W|$, $|V|$, в залежності від зміни частоти f коливань в контрольованому матеріалі (від зміни довжини хвилі λ_2 в матеріалі з малими порами). Зміну згасання амплітуди від частоти хвиль краще визначати за параметром співвідношення товщини матеріалу до довжини хвилі h_1 / λ_2 для матеріалів з плоским шаром (з малими порами або без них) та за параметром $m_s / (\rho_2 \lambda_2)$ для текстильних матеріалів. На рис.1 показано як змінюється згасання амплітуди хвиль при зміні їх частоти в матеріалі полімерного плоского шару з малими порами, що може застосовуватися в композитах, а на рис. 2 показано як змінюється згасання у текстильному матеріалі з наскрізними порами.

Як видно з наведених поверхонь при малих порах в полімерному матеріалі проходження ультразвукових хвиль наближається до проходження коливань в суцільному матеріалі. Це відбувається тому, що хвилі, які проходять крізь малі пори, менше впливають на результуючий сигнал, ніж ті, що проходять крізь пори в текстильному матеріалі (при певному співвідношенні розмірів наскрізних пор та довжини ультразвукових хвиль). Частина ультразвукових хвиль, яка проходить крізь полімерний матеріал, зазнає значного згасання у порівнянні з текстильним полотном, тому що він не має міжволоконної пористості в своїй структурі, так як текстильні матеріали. Також треба зазначити, що умовна товщина текстильного шару може значно переважати товщину полімерного матеріалу в композиті, через який можна пропускати ультразвукові хвилі в процесі безконтактного контролю. Це зумовлено меншим згасанням ультразвукових коливань в шарі текстилю.

Згасання відбитих ультразвукових хвиль значно менше впливає на зміну величини модуля комплексного коефіцієнта відбиття $\delta |V|$, ніж на зміну величини модуля комплексного коефіцієнта проходження $\delta |W|$ хвиль крізь полімерний матеріал з малими порами (див. рис.1). Якщо порівнювати ці показники відносних змін модулів комплексних коефіцієнтів ультразвукових хвиль з аналогічними для полотен, то для текстильних матеріалів різниця між $\delta |W|$ та $\delta |V|$ буде незначна, а їх величина буде значно меншою за ці показники для полімерних матеріалів з малими порами або без них.

Виходячи з наведеного у роботі матеріалу, доцільно зробити висновок, що згасанням ультразвукових хвиль при поперечному прозвучуванні текстильних полотен можна знехтувати. Середня швидкість розповсюдження ультразвукових хвиль при такому прозвучуванні текстильного одношарового матеріалу буде наближатися до швидкості розповсюдження звукових хвиль у повітрі, оскільки більша частина коливань проходить саме крізь нього, оминаючи самі нитки матеріалу. Для матеріалів з різною внутрішньою структурою швидкість розповсюдження хвиль може змінюватись.

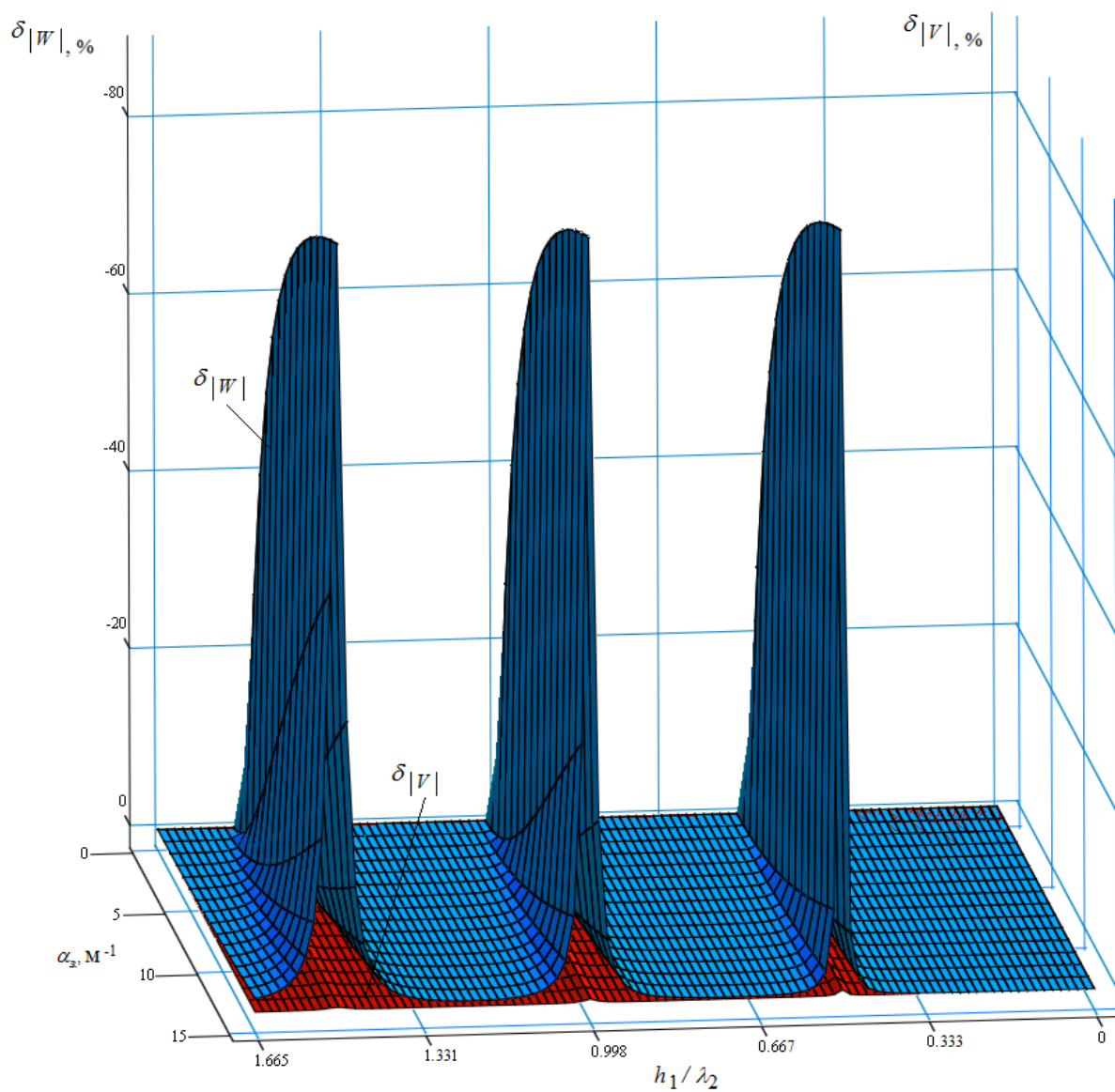


Рис. 1. Залежності відносних змін модулів комплексних коефіцієнтів проходження $\delta|W|$ та відбиття $\delta|V|$ для полімерного матеріалу з малими порами від параметрів h_1/λ_2 та α_3 .

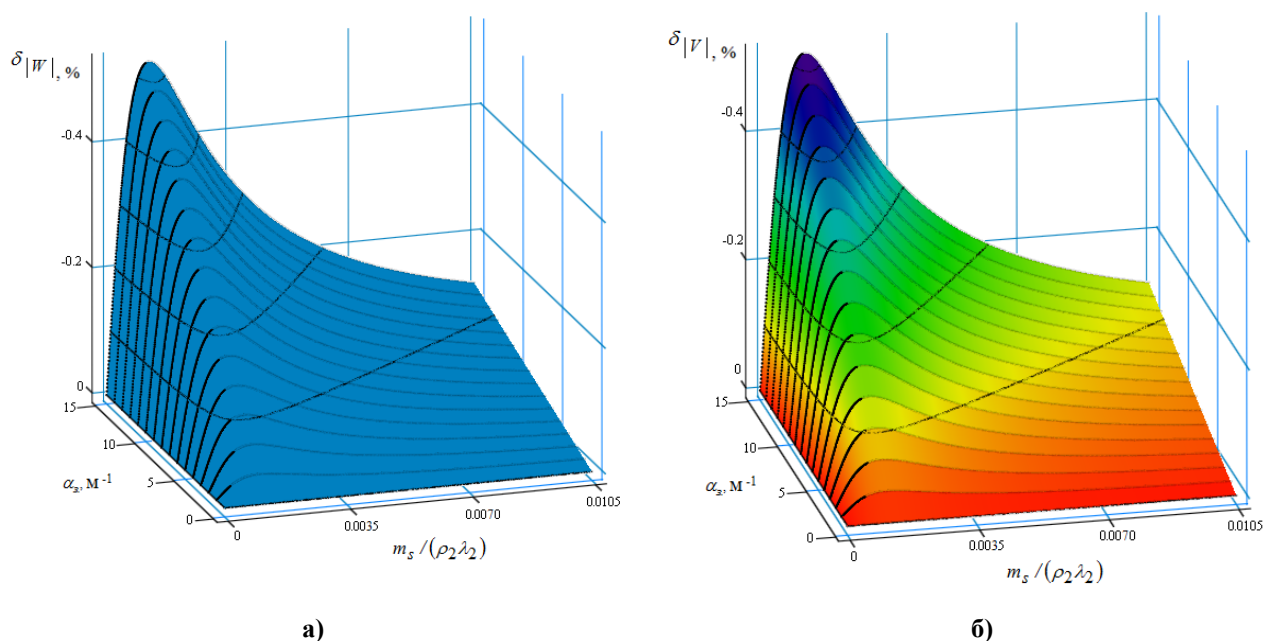


Рис. 2. Залежності відносних змін модулів комплексних коефіцієнтів проходження $\delta |W|$ та відбиття

$\delta |V|$ для текстильних матеріалів від параметрів $m_s / (\rho_2 \lambda_2)$ та α_3 :

а – залежність відносної зміни $\delta |W|$ від параметрів $m_s / (\rho_2 \lambda_2)$ та α_3 ;

б – залежність відносної зміни $\delta |V|$ від параметрів $m_s / (\rho_2 \lambda_2)$ та α_3 .

Висновки. Проаналізувавши зміну амплітуд ультразвукових хвиль в різних матеріалах, можна зробити висновок, що діапазон частот коливань, який можна використовувати для безконтактного контролю, та діапазони контрольованих параметрів матеріалів, які відповідають незначному амплітудному згасанню хвиль, можуть відрізняються між собою для текстилю та для плоского шару. Зазначене можна пояснити тим, що діапазон умовної товщини полотен, який визначається для можливості безконтактного поперечного прозвучування текстилю, може бути більшим за такий же діапазон для плоских одношарових матеріалів з малими порами та без них. Така відмінність між робочими діапазонами технологічних параметрів, які можна визначати безконтактно, спричинена внутрішньою структурою різних матеріалів. Це може впливати на здатність частини хвиль огинати сам матеріал. Проведені дослідження показали можливість використання малопотужних датчиків для визначення різних технологічних параметрів текстильних матеріалів без врахування згасання в них, що важливо при створенні нових засобів безконтактного контролю одношарових матеріалів з порами.

Література

1. Костюков А.Ф. Метод контроля технологических параметров сельскохозяйственных волокон с помощью ультразвука / А.Ф. Костюков // Вестник АГАУ. – 2013. – № 1. – С. 96–

References

1. Kostukov, A.F. (2013). Metod kontrolya tehnologicheskikh parametrov selskohozyajstvennykh volokon s pomoshyu ultrazvuka [The method of monitoring the technological parameters of agricultural fibers using ultrasound]. Vestnik AGAU. — Bulletin of Altai State

- 99.
2. 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.
3. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских. — М.: Наука, — 1973. — 343 с.
4. 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.
5. Здоренко В.Г. Технологічний контроль текстильних матеріалів / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко, О.В. Барилко // Метрологія та прилади. – 2017. – №5. – С. 86 – 88.
6. 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.
7. 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.
8. Лютак І.З. Адаптивний алгоритм обробки виміряного ультразвукового сигналу в частотній області / І.З. Лютак, І.С. Кісіль // Методи та прилади контролю якості. – 2006. – №16 – С. 15–18.
9. Шкарлет Ю.М. Бесконтактные методы ультразвукового контроля / Ю.М. Шкарлет. – М.: Машиностроение, 1974. – 57 с.
10. Защепкина Н.М. Ультра-звуковой пристрой для технологического контролю якості текстильних матеріалів / Н.М. Защепкина, В.Г. Здоренко // Вісник КНУТД. – 2007. – №5(37). – С. 40 – 43.
- Agricultural University, 1, 96 — 99 [In Russian].
2. Kandrin, Yu.V., Tsybalyist O.V., & Vorobiev N.P. (2011). Skorost rasprostraneniya ultrazvukovykh 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].
3. Brekhovskikh, L.M. (1973). Volny v sloistykh sredah [The waves in layered medium]. Moscow: Nauka [In Russian].
4. 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].
5. 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].
6. 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].
7. Zdorenko, V.G., & Barylko, S.V. (2013). Kontrol tehnologichnih parametriv tkanini za dopomogoyu ultrazvukovogo adaptivnogo pristroyu [Control of the technological parameters of the fabric with the ultrasonic adaptive device]. Visnik Vinnickogo politechnichnogo institutu. — Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute, 3, 7 — 11 [In Ukrainian].
8. Lutak, I.Z., & Kissel, I.S. (2006). Adaptivnij algoritm obrobki vimiryanoogo ultrazvukovogo signalu v chastotnij oblasti [Adaptive algorithm for processing the measured ultrasonic signal in the frequency domain]. Metodi ta priladi kontrolyu yakosti. — Methods and devices of quality control, 16, 15 — 18 [In Ukrainian].
9. Shkarlet, Yu.M. (1974). Beskontaktnye metody ultrazvukovogo kontrolya [Non-contact ultrasonic testing methods]. Moscow: Mashinostroenie [In Russian].
10. Zashchepkina, N.N., & Zdorenko, V.G. (2007). Ultrazvukovij pristrij dlya tehnologichnogo kontrolyu yakosti tekstilnih materialiv [Ultrasonic device for technological control of the quality of textile materials]. Visnik KNUVD. — Bulletin of the Kiev National University of Technology and Design, 5, 40 — 43 [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@knutd.com.ua

Kyiv National University of Technologies and Design

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ПРИ ИХ ПРОХОЖДЕНИИ И ОТРАЖЕНИИ ОТ ОДНОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОРАМИ РАЗНОГО РАЗМЕРА

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

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Исследовать как меняется затухание ультразвуковых волн в различных однослойных материалах с имеющимися порами разного размера. Указанное необходимо для возможности создания бесконтактных средств ультразвукового контроля таких материалов.

Методика. В работе для анализа процесса взаимодействия ультразвуковых волн с однослойными материалами с различными порами и для анализа изменения амплитудного затухания зондирующих колебаний использовался метод определения относительного изменения этого параметра с учетом толщины или поверхностной плотности материала.

Результаты. Приведены выражения для модулей комплексного коэффициента прохождения и отражения ультразвуковых волн от однослойных материалов с малыми порами, а также от текстильных однослойных материалов со сквозными порами, через которые проходит большая часть колебаний. Приведены зависимости относительных изменений амплитудных затуханий волн от частоты колебаний, толщины и поверхностной плотности материала. Показано, что затухание амплитуды ультразвуковых волн, которые взаимодействуют с однослойными материалами с малыми порами, и затухание колебаний для однослойных текстильных полотен могут сильно отличаться друг от друга. Эта разница вызвана огибанием части звуковых волн самих волокон текстильных полотен со сквозными порами при взаимодействии с ними зондирующих колебаний.

Научная новизна. Получены зависимости относительных изменений разницы модулей с учетом затухания и без него для комплексных коэффициентов отражения и прохождения ультразвуковых волн. Указанные колебания, взаимодействующих с однослойными материалами с различными порами, рассматриваются с учетом частоты ультразвуковых волн, размеров пор, толщины или поверхностной плотности самого материала.

Практическая значимость. Полученные зависимости для определения затухания амплитуды зондирующих ультразвуковых волн от структуры, пористости материала, его толщины или поверхностной плотности. Это позволит создавать бесконтактные средства контроля для материалов со сложной внутренней структурой и настраивать их в автоматическом режиме на изменение размеров пор, что может существенно влиять на погрешности таких приборов. На точность приборов, которые будут настраиваться на сложную структуру контролируемого однослойного материала, будет влиять именно параметр затухания зондирующих колебаний. В будущем это направление исследований позволит создавать бесконтактные методы и средства контроля технологических параметров различных однослойных материалов и интегрировать такие приборы и системы непосредственно в производственный процесс.

Ключевые слова: однослойный материал с малыми порами, модули комплексных коэффициентов прохождения и отражения волн, текстильный однослойный материал, относительное изменение амплитуд зондирующих колебаний, затухание ультразвуковых волн.

RESEARCH OF ATTENUATION OF ULTRASONIC WAVES AT THEIR PASSAGE AND REFLECTION FROM SINGLE-LAYERED MATERIALS WITH PORES OF DIFFERENT SIZES

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

Kyiv National University of Technologies & Design

Purpose. Research of attenuation of ultrasonic waves in various single-layer materials with available pores of different sizes changes in this work. The above is necessary for the possibility of creating non-contact means of ultrasonic testing of such materials.

Methodology. In the work to analyze the processes of interaction of ultrasonic waves with single-layer materials and various changes depending on the thickness or basis weight of the material.

Findings. Expressions are given for the modules of the complex coefficient of transmission and reflection of ultrasonic waves from single-layer materials with small pores, as well as from textile single-layer materials with through pores, through which most of the vibrations pass. The dependences of relative changes in the amplitude attenuation of waves on the oscillation frequency, thickness and basis weight of the material are given. It is shown that the attenuation of the amplitude of ultrasonic waves that interact with single-layer materials with small pores, and the damping of vibrations for single-layer textile fabrics can be very different from each other. This difference is caused by the bending of part of the sound waves of the fibers of textile fabrics with through pores during the interaction of vibrations.

Originality. The dependences of the relative changes in the difference of the modules with and without attenuation are obtained for the complex reflection and transmission coefficients of ultrasonic waves. These vibrations interacting with single-layer materials with different pores are considered taking into account the frequency of ultrasonic waves, pore sizes, thickness or basis weight of the material itself.

Practical value. The obtained dependences for determining the attenuation of the amplitude of the probe ultrasonic waves on the structure, porosity of the material, its thickness or surface density. This will allow to create non-contact control tools for materials with complex internal structures and automatically configure them to change pore sizes, which can significantly affect the errors of such devices. The accuracy of the devices that will be tuned to the complex structure of the monolayer material being controlled will be affected precisely by the attenuation parameter of the probe oscillations. In the future, this line of research will make it possible to create non-contact methods and means of monitoring the technological parameters of various single-layer materials and integrate such devices and systems directly into the production process.

Keywords: single-layer material with small pores, modules of complex transmission and reflection coefficients of waves, textile single-layer material, relative change in the amplitudes of sounding vibrations, attenuation of ultrasonic waves.