

УДК 677.017

**ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ МАТЕРІАЛУ ІЗ СКЛАДНОЮ СТРУКТУРОЮ****Барилко С. В., Зубович А. Д., Габіт Л. В.,  
Кошель О. С., Маніло І. П., Дрегуляс В. Є.**

Київський національний університет технологій та дизайну

**Мета.** Розглянути залежність амплітуд ультразвукових хвиль, що взаємодіють з контрольованим матеріалом з врахуванням згасання. Навести результати досліджень впливу поверхневої густини та розмірів пор матеріалу із складною структурою на зміну амплітуди ультразвукового сигналу.

**Методика.** Використані методи математичного та аналітичного моделювання; теорія розповсюдження та відбиття ультразвукових коливань від різних середовищ.

**Результати досліджень.** Зроблені дослідження проходження та відбиття хвиль від матеріалу із складною структурою, які дозволять створити адаптивні системи контролю матеріалів з можливістю отримання інформації про зміну поверхневої густини та розмірів пор в їхній структурі.

**Наукова новизна.** Отримані залежності амплітудних співвідношень ультразвукових хвиль, що пройшли крізь матеріал із складною структурою, та хвиль, які відбилися від поверхні його полотна.

**Практична значимість.** Створення ультразвукових безконтактних засобів контролю дасть можливість проводити безконтактний оперативний моніторинг технологічних параметрів різних матеріалів із складною структурою в процесі їх виробництва.

**Ключові слова:** поверхнева густина матеріалу, ультразвукові хвилі, амплітуда хвилі, пори матеріалу

На сьогоднішній день є необхідність у безконтактному контролі [1] поверхневої густини матеріалу із складною структурою (матеріалу з наявними порами) безпосередньо в процесі його виробництва, що дозволить оперативно реагувати на браковане полотно там де це потрібно. До матеріалів із складною структурою можна віднести текстильні полотна, пряжу та ін. Амплітуда ультразвукових хвиль є параметром, за допомогою якого можна точно та відносно при незначних витратах на обладнання визначати різні технологічні параметри матеріалів. Враховуючи зазначене, постає необхідність у більш детальному дослідженні можливості використання такого методу контролю поверхневої густини для матеріалів із складною структурою (трикотажних полотен).

За допомогою ультразвукового амплітудного методу можна визначати поверхневу густина, а також знаючи як змінюється амплітуда хвиль, які взаємодіють з цими трикотажними полотнами, можна забезпечити оперативний технологічний контроль

цього параметру в процесі виробництва. Контролювати зазначений технологічний параметр в реальних умовах виробництва можна тільки проаналізувавши як змінюються амплітуди хвиль, одна, яка проходить крізь полотно, а інша, що відбивається від нього, з врахуванням різних дестабілізуючих факторів, які можуть виникати під час технологічного процесу. Аналіз цього процесу дає можливість зробити висновок, що амплітуда ультразвукових хвиль, які проходять крізь трикотаж, залежить ще й від положення самого трикотажного полотна та його натягу, який можна визначати за зміною амплітуди відбитої ультразвукової хвилі.

### **Постановка завдання**

Для того, щоб точно визначати поверхневу густину необхідно враховувати, що ультразвуковий сигнал, який проходить крізь контрольоване трикотажне полотно представляє собою суперпозицію сигналів [2], один з яких пройшов крізь пори, а інший, який пройшов безпосередньо крізь самі нитки. Оскільки більша частина ультразвукових хвиль проходить в основному крізь пори полотна, то в такому випадку загальне згасання ультразвукового сигналу буде меншим ніж згасання хвиль в схожому однорідному матеріалі (тому у деяких випадках ним можна знехтувати). Виходячи з наведеного, необхідно отримати основні співвідношення амплітуд ультразвукових хвиль [3], що взаємодіють з контрольованим трикотажним полотном з врахуванням згасання в матеріалі ниток.

### **Результати досліджень**

Проведемо аналіз проходження крізь трикотажне полотно плоскої ультразвукової хвилі при її нормальному падінні. Процес проходження будемо розглядати з урахуванням багаторазових відбивань та накладань хвиль, використовуючи принцип суперпозиції.

Знайдемо комплексний коефіцієнт проходження. Нехай тиск у падаючій хвилі дорівнює  $P_0$ , а в тій, що пройшла матеріал –  $P_{np}$ . Для визначення коефіцієнту проходження необхідно знайти відношення тиску у хвилі, що пройшла крізь полотно, до тиску у хвилі, яка падає на нього. Акустичний опір середовища, з якого падає хвиля, дорівнює  $Z_1$ , матеріалу ниток, що перекривають інші нитки в переплетінні відносно випромінювача ультразвукових хвиль –  $Z_2$ , матеріалу ниток, які перекриваються в переплетінні також відносно випромінювача –  $Z_3$ , середовища, в яке падає хвиля після проходження –  $Z_4$  ( $Z = \rho c$ , де  $\rho$  і  $c$  відповідно щільність середовища і швидкість розповсюдження в ньому ультразвукової хвилі).

Тиск у хвилі, після проходження трикутного полотна, можна подати у вигляді суперпозиції тисків у хвилях:

$$\begin{aligned}
 P_{np.} = \sum_{i=1}^N P_i = P_0 & \left( (G_1 W_{12} W_{24}' + G_2 W_{12}'' W_{24}) \cdot e^{jK_2 d_c \frac{\pi}{4}} + \right. \\
 & + (G_3 W_{12}' W_{23} W_{34} + G_4 W_{13}' W_{32} W_{24}) \cdot e^{2jK_{23} d_c \frac{\pi}{4}} + \\
 & + (G_1 W_{12} W_{24}' V_{24} V_{21} + G_2 W_{12}'' W_{24} V_{24} V_{21}) \cdot e^{3jK_2 d_c \frac{\pi}{4}} + \\
 & + (G_3 W_{12}' W_{23} W_{34} V_{21} V_{34} (1 + V_{23}) (1 + V_{32})) + \\
 & \left. + G_4 W_{13}' W_{32} W_{24} V_{31} V_{24} (1 + V_{32}) (1 + V_{23}) \right) \cdot e^{6jK_{23} d_c \frac{\pi}{4} + \dots} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Тоді комплексний коефіцієнт проходження можна визначити як:

$$\begin{aligned}
 W = \frac{P_{np.}}{P_0} = G_1 W_{12} W_{24}' \cdot e^{jK_2 d_c \frac{\pi}{4}} \sum_{N=0}^{\infty} \left( V_{24} V_{21} \cdot e^{2jK_2 d_c \frac{\pi}{4}} \right)^N + \\
 + G_2 W_{12}'' W_{24} \cdot e^{jK_2 d_c \frac{\pi}{4}} \sum_{N=0}^{\infty} \left( V_{24} V_{21} \cdot e^{2jK_2 d_c \frac{\pi}{4}} \right)^N + \\
 + G_3 W_{12}' W_{23} W_{34} \cdot e^{2jK_{23} d_c \frac{\pi}{4}} \sum_{N=0}^{\infty} \left( V_{21} V_{34} (1 + V_{23}) (1 + V_{32}) \cdot e^{4jK_{23} d_c \frac{\pi}{4}} \right)^N + \\
 + G_4 W_{13}' W_{32} W_{24} \cdot e^{2jK_{23} d_c \frac{\pi}{4}} \sum_{N=0}^{\infty} \left( V_{31} V_{24} (1 + V_{32}) (1 + V_{23}) \cdot e^{4jK_{23} d_c \frac{\pi}{4}} \right)^N, \quad (2)
 \end{aligned}$$

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, верхніми позначками над індексом показано скільки разів відбувалось накладання хвиль);  $N$  – кількість перевідбивань хвиль, що дорівнює  $0, 1, 2, 3, \dots, \infty$ ;  $K_2$  – хвильове число матеріалу ниток, що перекривають інші нитки в переплетінні відносно випромінювача ультразвукових хвиль;  $K_{23}$  – середнє хвильове число ниток;  $G_1 \div G_4$  – коефіцієнти площі розсіювання потоку енергії ультразвукових коливань;  $d_c \frac{\pi}{4}$  – величина, що визначає середню відстань проходження і згасання ультразвукового сигналу в матеріалі ниток.

Коефіцієнти площі розсіювання потоку енергії ультразвукових коливань  $G_1 \div G_4$  представляють собою добутки величин коефіцієнтів площ  $g'_1 \div g'_4$  та коефіцієнтів часткового впливу відбиття на ультразвуковий сигнал  $g''_1 \div g''_4$ . Сума коефіцієнтів площ різних ділянок контрольованого полотна, на які падають і розсіюються хвилі, дорівнює  $g'_1 + g'_2 + g'_3 + g'_4 = 1$ . Коефіцієнти  $g''_1 \div g''_4$  є показниками відбиття хвиль від межі середовищ ниток при їхніх різних акустичних опорах всередині трикотажу при взаємному перекритті. Вираз (2) є сумою нескінченно спадної геометричної прогресії. Суму такої прогресії врахувавши  $g'_1 \div g'_4$  можна показати як:

$$\begin{aligned}
 W = & \left( g'_1 W_{12} W'_{24} + g'_2 W''_{12} W_{24} \right) \cdot e^{jK_2 d_c \frac{\pi}{4}} + \\
 & + \left( g'_3 W'_{12} W_{23} W_{34} + g'_4 W'_{13} W_{32} W_{24} \right) \cdot e^{2jK_{23} d_c \frac{\pi}{4}} \times \\
 & \times \left[ 1 - \left( (g'_1 + g'_2) \cdot V_{24} V_{21} \cdot e^{2jK_2 d_c \frac{\pi}{4}} + \left( g'_3 \left( 1 - \left( 1 - V_{21} V_{34} \right) \left( 1 + V_{23} \right) \left( 1 + V_{32} \right) \right) + \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. + g'_4 \left( 1 - \left( 1 - V_{31} V_{24} \right) \left( 1 + V_{32} \right) \left( 1 + V_{23} \right) \right) \right) \cdot e^{4jK_{23} d_c \frac{\pi}{4}} \right) \right]^{-1}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Отримані вирази дають можливість проводити детальний розрахунок та аналіз взаємодії ультразвукових хвиль з нитками трикотажного полотна із різними

акустичними опорами, що сильно відрізняються один від одного. Ці залежності допоможуть детально проаналізувати взаємодію ультразвукових хвиль з трикотажними полотнами з різною структурною будовою.

При схожих акустичних опорах ниток, що перекриваються ( $Z_2 \approx Z_3$ ) з досить малими порами між ними ( $G_1 = G_2 \approx 0$ ), якщо по обидва боки контрольованого полотна знаходиться одне і теж середовище ( $Z_1 = Z_4$ ), то вираз (3) для коефіцієнту проходження  $W$  можна представити у вигляді:

$$W = \frac{(G_3 + G_4) W_{12}' W_{21} e^{2jK_{23}d_c \frac{\pi}{4}}}{1 - (G_3 + G_4) V_{21} V_{21}' e^{4jK_{23}d_c \frac{\pi}{4}}}. \quad (4)$$

Оскільки ( $G_3 + G_4 \approx 1$ ), залежність (4) можна переписати ще так:

$$W = \frac{W_{12}' W_{21} \cdot e^{2jK_{23}d_c \frac{\pi}{4}}}{1 - V_{21} V_{21}' \cdot e^{4jK_{23}d_c \frac{\pi}{4}}}, \quad (5)$$

де  $d_c$  – середній діаметр ниток полотна.

Відповідні значення для  $W$  і  $V$  можна записати як:

$$W_{12} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}, \quad W_{21} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}, \quad W_{13} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_3}, \quad (6)$$
$$W_{12}' = \frac{2Z_1 M}{Z_1 + Z_2}, \quad W_{13}' = \frac{2Z_1 M}{Z_1 + Z_3}.$$

$$V_{12} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad V_{21} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad V_{13} = \frac{Z_1 - Z_3}{Z_1 + Z_3}. \quad (7)$$

У тому випадку, коли є згасання ультразвукового сигналу в матеріалі трикотажного полотна, хвильове число  $K_{23}$  стає комплексним і його можна показати у вигляді:

$$K_{23} = \frac{2\pi f}{c_2} + j\alpha, \quad (8)$$

де  $c_2$  – швидкість розповсюдження ультразвукової хвилі в трикутному полотні;  
 $f$  – частота ультразвукових коливань;  $\alpha$  – коефіцієнт згасання ультразвукового сигналу  
в матеріалі полотна.

Після підстановки залежностей (7) і (8) у вираз (6) та нескладних математичних  
перетворень комплексний коефіцієнт проходження  $W$  можна представити у вигляді:

$$W = \frac{M}{\cos\left(\frac{d_c \pi^2 f}{c_2} + 2j d_c \frac{\pi}{4} \alpha\right) - j\left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2}\right) \cdot \sin\left(\frac{d_c \pi^2 f}{c_2} + 2j d_c \frac{\pi}{4} \alpha\right)}, \quad (9)$$

де  $M$  – величина, що характеризує накладання частини відбитої та падаючої  
ультраузвукових хвиль, а також їхнє проходження крізь трикутне полотно.

Значення  $M$  можна записати як:

$$M = \frac{e^{2d_c \frac{\pi}{4} \left(-\alpha + j \frac{2\pi f}{c_2}\right)} (\cos \nu - 1) - \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}\right)^2 \cdot e^{2d_c \frac{\pi}{4} \left(-\alpha + j \frac{2\pi f}{c_2}\right)} (\cos \nu + 1)}{1 - \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}\right)^2 \cdot e^{4d_c \frac{\pi}{4} \left(-\alpha + j \frac{2\pi f}{c_2}\right)} \cos \nu}, \quad (10)$$

де  $\nu$  – кут між вектором хвилі, що відбивається від полотна у бік приймаючого перетворювача  
(перетворювача ультразвукового сигналу в електричну напругу), та самим полотном.

Для досліджуваних зразків, що за своєю структурою будуть наближатися до  
плоского шару  $\cos \nu \rightarrow 1$ , а для тих, які наближаються до структури рихлісного шару  
(характерно для трикутaju)  $\cos \nu \rightarrow 0$ .

Комплексний коефіцієнт проходження  $W$ , виділяючи дійсну та уявну його  
частини, можна показати ще так:

$$W = Re W + j Im W = \frac{A}{A^2 + B^2} + j \frac{B}{A^2 + B^2}, \quad (11)$$

де  $Re W$ ,  $Im W$  – дійсна та уявна частини комплексного коефіцієнта проходження  $W$ .

Величини  $A$  і  $B$  із залежності (11) можна подати як:

$$A = \left( ch \frac{\alpha d_c \pi \cos \nu}{2} + \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \cdot sh \frac{\alpha d_c \pi \cos \nu}{2} \right) \cdot \cos \frac{\pi^2 f d_c \cos \nu}{c_2}, \quad (12)$$

$$B = \left( sh \frac{\alpha d_c \pi \cos \nu}{2} + \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \cdot ch \frac{\alpha d_c \pi \cos \nu}{2} \right) \cdot \sin \frac{\pi^2 f d_c \cos \nu}{c_2}. \quad (13)$$

Підставивши вираз (10) у (9) та врахувавши, що для текстильних матеріалів величина  $\left| K_{23} d_{oy} \frac{\pi}{4} \cos \nu \right| \ll 1$ , дійсну  $ReW$  та уявну  $ImW$  частини комплексного коефіцієнта проходження  $W$  можна представити так:

$$ReW = \frac{1 + \alpha \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) d_c \frac{\pi}{2} \cos \nu}{\left( 1 + \alpha \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) d_c \frac{\pi}{2} \cos \nu \right)^2 + \left( \frac{2\pi f}{c_2} \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) d_c \frac{\pi}{2} \cos \nu \right)^2}, \quad (14)$$

$$ImW = \frac{\frac{2\pi f}{c_2} \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) d_c \frac{\pi}{2} \cos \nu}{\left( 1 + \alpha \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) d_c \frac{\pi}{2} \cos \nu \right)^2 + \left( \frac{2\pi f}{c_2} \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) d_c \frac{\pi}{2} \cos \nu \right)^2}, \quad (15)$$

тоді модуль комплексного коефіцієнта проходження  $|W|$  можна записати у вигляді:

$$|W| = \frac{1}{\sqrt{\left( 1 + \alpha \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) d_c \frac{\pi}{2} \cos \nu \right)^2 + \left( \frac{2\pi f}{c_2} \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) d_c \frac{\pi}{2} \cos \nu \right)^2}}. \quad (16)$$

Коли немає згасання в матеріалі тканини  $\alpha = 0$ , (16) можна подати як:

$$|W| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{2\pi f}{c_2} \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) d_c \frac{\pi}{2} \cos \nu \right)^2}}. \quad (17)$$

Після перетворень, введення коефіцієнту  $K$ , який враховує відстані та об'єм повітря між нитками полотна та зважаючи на те, що  $Z_1 \ll Z_2$ , нерівність  $Z_1/Z_2 \ll 1$

має місце для повітря (навколишнього середовища) та контрольованого трикотажу, тоді вираз (17) можна записати у кінцевому вигляді так:

$$|W| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{K m_s f \cos \nu}{Z_1}\right)^2}}, \quad (18)$$

де  $m_s$  – поверхнева густина трикотажного полотна.

Комплексний коефіцієнт відбиття ультразвукового сигналу від трикотажу  $V$  можна представити як:

$$V = 1 - W = \operatorname{Re} V + j \operatorname{Im} V = \frac{A^2 + B^2 - A}{A^2 + B^2} - j \frac{B}{A^2 + B^2}, \quad (19)$$

де  $\operatorname{Re} V$ ,  $\operatorname{Im} V$  – дійсна та уявна частини комплексного коефіцієнту відбиття  $V$ .

Модуль комплексного коефіцієнту відбиття  $|V|$ , знаючи, що відношення акустичних опорів  $Z_1/Z_2 \ll 1$ , можна записати у вигляді:

$$|V| = \left( 1 + \left( 1 - \left( \operatorname{ch} \frac{\alpha d_c \pi \cos \nu}{2} + \frac{Z_2}{2Z_1} \cdot \operatorname{sh} \frac{\alpha d_c \pi \cos \nu}{2} \right) \cdot 2 \cos \frac{\pi^2 f d_c \cos \nu}{c_2} \right) \times \right. \\ \times \left( \left( \left( \operatorname{ch} \frac{\alpha d_c \pi \cos \nu}{2} + \frac{Z_2}{2Z_1} \cdot \operatorname{sh} \frac{\alpha d_c \pi \cos \nu}{2} \right) \cdot \cos \frac{\pi^2 f d_c \cos \nu}{c_2} \right)^2 + \right. \\ \left. \left. + \left( \left( \operatorname{sh} \frac{\alpha d_c \pi \cos \nu}{2} + \frac{Z_2}{2Z_1} \cdot \operatorname{ch} \frac{\alpha d_c \pi \cos \nu}{2} \right) \cdot \sin \frac{\pi^2 f d_c \cos \nu}{c_2} \right)^2 \right)^{-1} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (20)$$

Коли немає згасання, яке може спричинятися матеріалом трикотажу,  $\alpha = 0$ , тоді залежність (20) можна подати так:



$$|V| = \sqrt{1 + \frac{1 - 2 \cdot \cos \frac{\pi^2 f d_c \cos \nu}{c_2}}{\left( \cos \frac{\pi^2 f d_c \cos \nu}{c_2} \right)^2 + \left( \frac{Z_2}{2Z_1} \cdot \sin \frac{\pi^2 f d_c \cos \nu}{c_2} \right)^2}} \quad (21)$$

Для трикотажу нерівність  $\left( \pi^2 f d_c \cos \nu \right) / c_2 \ll 1$  також справджується, тоді вираз (21) можна записати у вигляді:

$$|V| = \frac{\left( \frac{Z_2}{2Z_1} \cdot \frac{\pi^2 f d_c \cos \nu}{c_2} \right)}{\sqrt{1 + \left( \frac{Z_2}{2Z_1} \cdot \frac{\pi^2 f d_c \cos \nu}{c_2} \right)^2}} \quad (22)$$

Остаточно спростивши вираз (22) та підставивши коефіцієнт  $K$ , отримаємо залежність для модуля  $|V|$  коефіцієнта відбиття ультразвукового сигналу від трикотажного полотна у вигляді:

$$|V| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{Z_1}{K m_s f \cos \nu} \right)^2}} \quad (23)$$

Модуль  $|V|$  в дійсності складно визначити за вимірюваннями, оскільки відбите випромінювання буде розсіюватися від трикотажного полотна.

Оскільки на визначення поверхневої густини  $m_s$  трикотажних полотен може впливати багаторазове відбиття ультразвукових хвиль від поверхонь перетворювачів та поверхні трикотажу з накладанням їх безперервного сигналу, то доцільно застосовувати імпульсний ультразвуковий сигнал [4] при контролі технологічного параметру. Якщо час проходження імпульсом контрольованого полотна більший за його тривалість, то проходження сигналом цього трикотажу відповідає розповсюдженню в безмежному середовищі. При контролі трикотажних полотен тривалість імпульсу перевищує час проходження ним контрольованих зразків. В цьому випадку буде відбуватися

багаторазове відбиття окремих складових імпульсу від меж ниток полотна і суміжних з ними середовищ.

Враховуючи отримані залежності (18) та (23) співвідношень амплітуд ультразвукових хвиль, які взаємодіють з контрольованим трикотажним полотном та враховуючи, що доцільно використовувати імпульсний зондуючий сигнал, то в такому випадку вираз для нього можна представити так:

$$P_1(t') = P_0 \cdot \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \times \\ \times \left( \cos \omega_0 \left( \frac{K m_s (b(2N+1) \cos \nu + 1)}{\pi Z_2} - t \right) + j \sin \omega_0 \left( \frac{K m_s (b(2N+1) \cos \nu + 1)}{\pi Z_2} - t \right) \right) \times \\ \times \exp \left[ - \frac{\left( \frac{K m_s (b(2N+1) \cos \nu + 1)}{\pi Z_2} - t \right)^2}{\left( \frac{\tau_0}{2 \ln \sqrt{2}} \right)^2} - \frac{\alpha (2N+1) K m_s \cos \nu}{\pi \rho_2} \right]. \quad (24)$$

Оскільки вимірюється дійсна частина залежності (24), що представляє собою тиск в хвилі ультразвукового імпульсного сигналу, яка пройшла контрольоване полотно, то амплітуду цієї хвилі можна описати наступною залежністю:

$$A_W(t') = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \cos \omega_0 \left( \frac{K m_s (b(2N+1) \cos \nu + 1)}{\pi Z_2} - t \right) \times \\ \times \exp \left[ - \frac{\left( \frac{K m_s (b(2N+1) \cos \nu + 1)}{\pi Z_2} - t \right)^2}{\left( \frac{\tau_0}{2 \ln \sqrt{2}} \right)^2} - \frac{\alpha (2N+1) K m_s \cos \nu}{\pi \rho_2} \right]. \quad (25)$$

де  $t' = t - \frac{\pi d_c}{2c_2}$  – час з врахуванням затримки ультразвукового сигналу в матеріалі полотна;  $t$  – час без врахування затримки ультразвукового сигналу;  $\omega_0$  – колова частота заповнення імпульсного сигналу;  $b = \omega^* / \omega_0$  – коефіцієнт відношення постійної колової частоти та колової частоти заповнення імпульсного сигналу;  $\tau_0$  – тривалість імпульсу.

Для ультразвукового імпульсного сигналу із збільшенням його тривалості зменшується амплітудна похибка в порівнянні з безперервним сигналом. Тому необхідно вибирати тривалість ультразвукового імпульсного сигналу так, щоб амплітудна похибка наближалась до найменших своїх значень при цьому не допускаючи перевідбиття ультразвукових хвиль від поверхонь перетворювачів та контрольованого трикотажного полотна.

На рис. 1 показано як впливає поверхнева густина  $m_s$  та розміри пор на амплітуду ультразвукової хвилі, яка пройшла крізь контрольоване трикотажне полотно.

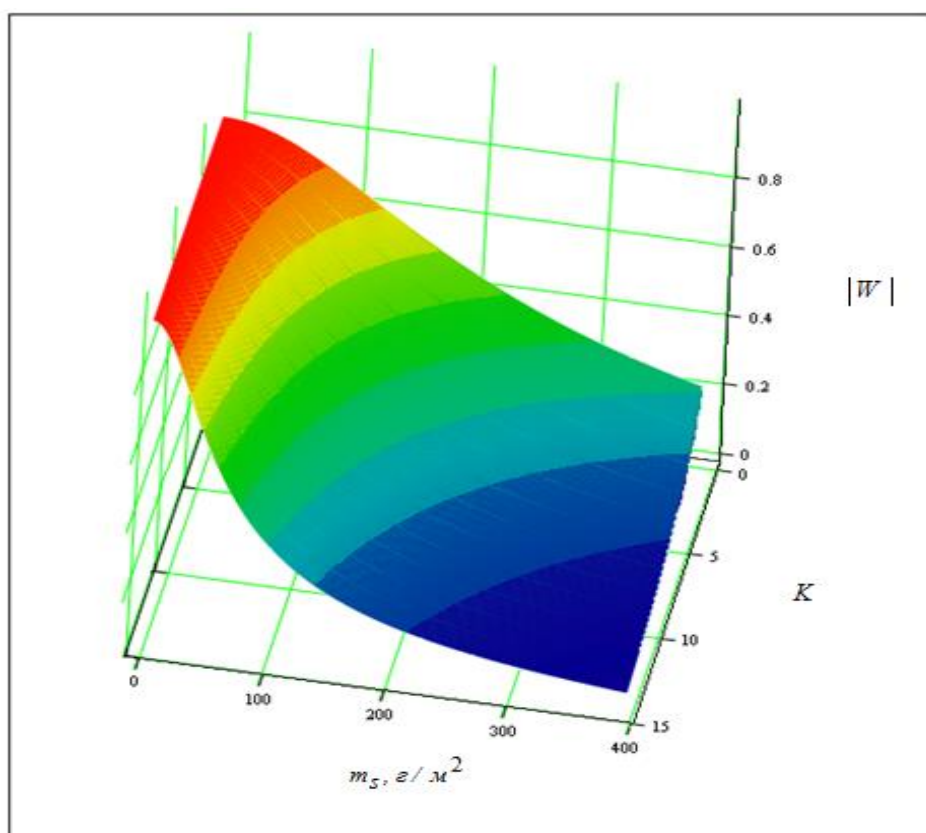


Рис. 1. Поверхня, яка показує вплив поверхневої густини  $m_s$  та зміни розмірів пор, які представлені коефіцієнтом  $K$ , на амплітуду ультразвукової хвилі, що пройшла контрольоване полотно і представлена модулем  $|W|$

На рис. 1 можна побачити, що на амплітуду ультразвукової хвилі можуть суттєво впливати як поверхнева густина  $m_s$  трикотажного полотна, так і його пори при фіксованій частоті коливань.

### Висновки

Проведений аналіз показав можливість використання ультразвукових хвиль для контролю поверхневої густини трикотажного полотна. Тому подальший розвиток

безконтактних ультразвукових методів контролю поверхневої густини трикотажних полотен дасть можливість у майбутньому створювати високоточні засоби вимірювання з можливістю адаптації їх до складної структури самого полотна. Це дозволить проводити безперервний оперативний контроль поверхневої густини різних трикотажних полотен, а також дасть можливість підвищити якість та конкурентоспроможність готової продукції.

## Список використаних джерел

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. 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.

## 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 AGAU, 3, 94-98 [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]. Vestnik KhNU. – Bulletin of Khmelnytsky National University, 3, 90-96 [in Ukrainian].

**Barylko Sergiy**

[poo4ta@bigmir.net](mailto:poo4ta@bigmir.net)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2785-5784>

*Kyiv National University of  
Technologies and Design*

**Koshel Oleksandr**

[Koshel\\_aleksandr@ukr.net](mailto:Koshel_aleksandr@ukr.net)

*Kyiv National University of  
Technologies and Design*

**Manilo Iryna**

[iramano97@gmail.com](mailto:iramano97@gmail.com)

*Kyiv National University of  
Technologies and Design*

**Zubovych Anna**

[annnz@ukr.net](mailto:annnz@ukr.net)

*Kyiv National University of  
Technologies and Design*

**Habit Liudmyla**

[Vohonyl@gmail.com](mailto:Vohonyl@gmail.com)

*Kyiv National University of  
Technologies and Design*

**Dregulyas Vladislav**

[kaks@knu.ua](mailto:kaks@knu.ua)

*Kyiv National University of  
Technologies and Design*

**Исследование возможности использования ультразвуковых волн для контроля параметров материала со сложной структурой**

**Барылко С. В., Zubovich A. D., Gabit L. V., Koshel A. S., Manilo I. P., Dregulyas V. E.**  
Киевский национальный университет технологий и дизайна

**Цель.** Рассмотреть зависимость амплитуд ультразвуковых волн, взаимодействующих с контролируемым материалом с учетом угасания. Привести результаты исследований влияния поверхностной плотности и размеров пор материала со сложной структурой на изменение амплитуды ультразвукового сигнала.

**Методика.** Использованные методы математического и аналитического моделирования; теория распространения и отражения ультразвуковых колебаний от различных сред.

**Результаты исследований.** Выполнены исследования прохождения и отражения волн от материала со сложной структурой, которые позволят создать адаптивные системы контроля материалов с возможностью получения информации об изменении поверхностной плотности и размеров пор в их структуре.

**Научная новизна.** Получены зависимости амплитудных соотношений ультразвуковых волн, прошедших сквозь материал со сложной структурой, и волн, отразившихся от поверхности его полотна.

**Практическая значимость.** Создание ультразвуковых бесконтактных средств контроля позволит проводить бесконтактный оперативный мониторинг технологических параметров различных материалов со сложной структурой в процессе их производства.

**Ключевые слова:** поверхностная плотность материала, ультразвуковые волны, амплитуда волны, поры материала

**Research of the possibility of using ultrasonic waves to control the parameters of a material with a complex structure**

**Barylko S. V., Zubovych A. D., Habit L. V., Koshel A. S., Manilo I. P., Dregulyas V. E.**  
Kyiv National University of Technology and Design

**Purpose.** Consider the dependence of the amplitudes of ultrasonic waves interacting with the controlled material, taking into account the extinction. Results of studies of the effect of basis weight and pore size of a material with a complex structure on the change in the amplitude of an ultrasonic signal are presents.

**Methodology.** Used methods of mathematical and analytical modeling; theory of propagation and reflection of ultrasonic vibrations from various media.

**Findings.** Studies of the passage and reflection of waves from a material with a complex structure that will allow the creation of adaptive material control systems with the ability to obtain information about changes in basis weight and pore size in their structure are resulted.

**Originality.** The obtained dependences of the amplitude ratios of ultrasonic waves transmitted through a material with a complex structure, and waves reflected from the surface of his canvas.

**Practical value.** The creation of ultrasonic non-contact monitoring tools will allow for non-contact operational monitoring of the technological parameters of various materials with a complex structure in the process of their production.

**Keywords:** basis weight of the material, ultrasonic waves, wave amplitude, pores of the material