

**В.М. Тонконогий, д.т.н., проф.****М.О. Голофєєва, к.т.н.**

Одеський національний політехнічний університет

**А.О. Перпері, к.т.н.**

Одеська державна академія будівництва та архітектури

**О.В. Немченко, студ.**

Одеський національний політехнічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ АКУСТИЧНИХ ПОЛІВ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ДИСИПАТИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НЕМЕТАЛЕВИХ ГЕТЕРОГЕННИХ МАТЕРІАЛІВ

*Розглядаються питання вимірювання дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів та виробів з них акустичним ударним методом, заснованим на залежності декременту згасання коливань та швидкості розповсюдження акустичної хвилі в матеріалі. Оскільки при проходженні звукової хвилі через гетерогенний матеріал форма імпульсу зондування суттєво змінюється, необхідно встановити закономірності такого перетворення. Проведені дослідження особливостей формування акустичних полів в неметалевих гетерогенних матеріалах та запропонована математична модель перетворення звукової хвилі під час проходження через такий матеріал, що враховує його фізико-механічні характеристики.*

**Ключові слова:** акустичне поле; неметалевий гетерогенний матеріал; дисипативні властивості; акустичний метод вимірювання.

**Постановка проблеми.** Для забезпечення випереджаючого розвитку машинобудування необхідне інтенсивне використання нових конструкційних матеріалів. Усе більшого застосування знаходять різного виду гетерогенні матеріали і структури, які складаються з двох або більше компонентів (армуючого наповнювача і полімерної матриці) і мають специфічні фізико-механічні властивості, відмінні від сумарних властивостей складових компонентів. Такі матеріали відрізняються високими функціональними можливостями і забезпечують підвищення надійності, зниження маси виробів, можливість експлуатації в екстремальних умовах [11].

Одним з таких матеріалів є синтегран (різновид полімербетону) – високонаповнений гетерогенний матеріал на основі епоксидної матриці, наповнювачів у вигляді гравію трьох-чотирьох фракцій і дрібнодисперсного порошку з високоміцних гранітів.

Основною перевагою синтеграну, порівняно з традиційними конструкційними матеріалами є вібростійкість [1, 7]. Ефективне використання таких матеріалів вимагає визначення достовірних значень характеристик демпфування, а також закономірності їх зміни в процесі навантаження [5, 6, 8].

**Викладення основного матеріалу.** Неметалеві гетерогенні матеріали є досить складними об'єктами для контролю, оскільки характеризуються анізотропією властивостей, великою різноманітністю типів структур, специфічними фізичними властивостями (електро-, тепло-, звукоізоляційні). Їм притаманні й недоліки. Через складність форми деталей, наявність великої кількості закладних металевих елементів і низьку текучість епоксидно-гранітної суміші в процесі лиття можливе виникнення різних дефектів: повітряних раковин, нерівномірного розподілу фракцій гранітної крихти і епоксидної матриці об'ємом деталі, відшарування закладних деталей. Це, в свою чергу, призводить до виникнення анізотропії властивостей матеріалів і, як наслідок, – до невідповідності конструкції поставленим вимогам. Це ж відноситься до дисипативних властивостей таких матеріалів, оскільки їх компоненти суттєво відрізняються один від одного за дисипативними властивостями, а їх розподілення об'ємом виробу, від якого залежить ефективне значення декременту згасання коливань, складно передбачити [10].

Розсіювання енергії в матеріалі залежить від параметрів коливань, структури та характеру напруженого стану матеріалу, розмірів і форми зразків. Треба зазначити відмінності довідкових даних щодо характеристик демпфірування для одних і тих самих матеріалів. Це свідчить, в першу чергу, про недосконалість методів дослідження розсіювання енергії, які не враховують зазначених особливостей.

При дослідженні динамічних характеристик неметалевих гетерогенних матеріалів, для яких характерні складні процеси розповсюдження енергії використовання відомих експериментальних методів призводить до значних похибок, оскільки вони не враховують залежності дисипативних властивостей від частоти і напружено-деформованого стану матеріалу, зміни параметрів пружних хвиль при проходженні через матеріал, не дають можливості досліджувати демпфірування в конструкціях в цілому і не дозволяють визначити вплив кожного з окремо діючих механізмів дисипації енергії, оскільки базуються на спрощених моделях віброгасіння.

Відомо, що структурна анізотропія матеріалу, геометрія об'єкта і стан поверхонь, зовнішній вплив (теплове і електромагнітне), а також деформація об'єкта контролю впливають на швидкість звуку в матеріалі. Пропонується акустичний метод вимірювання дисипативних властивостей гетерогенних матеріалів, заснований на вимірюванні швидкості розповсюдження звукових хвиль, що проходять через досліджуваний зразок матеріалу. Такий метод дає можливість виявити залежність демпфірування від зазначених вище особливостей.

Залежність декременту згасання коливань від швидкості акустичних хвиль в синтеграні описується формулою:

$$\lambda = 8,304 \cdot 10^{-5} \cdot \rho^2 \cdot (1+\nu)^2 \cdot C^4 - 4,218 \cdot 10^{-3} \cdot \rho \cdot (1+\nu) \cdot C^2 + 0,073, \quad (1)$$

де  $\lambda$  – декремент згасання коливань;  $C$  – швидкість розповсюдження поперечної звукової хвилі в синтеграні, м/с;  $\rho$  – щільність синтеграну, кг/м<sup>3</sup>;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

На рисунку представлена схема вимірювання швидкості пружної поперечної хвилі, що проходить через зразок матеріалу.

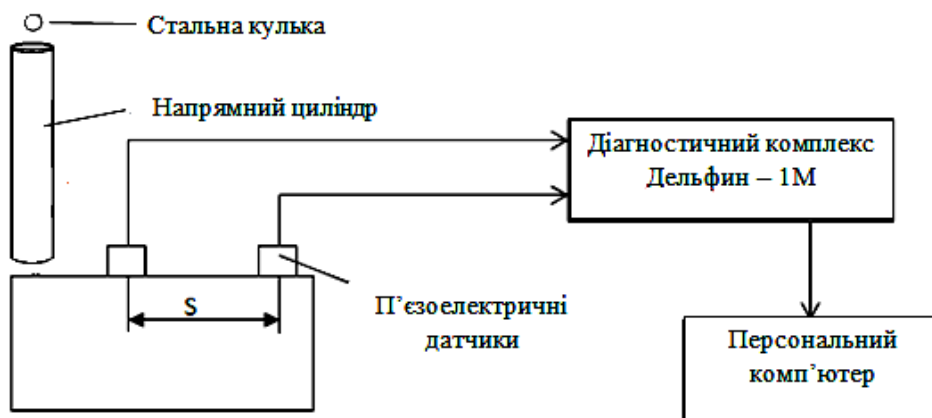


Рис. 1. Схема вимірювання швидкості пружної хвилі:  
 $S$  – база прозвучування

Зразок із досліджуваного матеріалу консольно закріплюється. На ньому на фіксованій відстані  $S$  (база прозвучування) встановлюються ідентичні за розмірами та масою віброакустичні п'єзоелектричні датчики АВС 117, за допомогою яких отримуються сигнали, що пропорційні переміщенню. Зразок піддається ударному навантаженню. Тарований удар наноситься шляхом падіння стальної кульки діаметром 40 мм з висоти 200 мм. Для забезпечення падіння кульки в необхідну точку поверхні об'єкта контролю використовується напрямний циліндр, що встановлюється перпендикулярно до поверхні.

Сигнали з датчиків вводяться до блока електроніки діагностичного комплексу «Дельфін-1М», що забезпечує комутацію, узгодження, попередню фільтрацію та введення вимірювальних даних до комп'ютера за допомогою аналогово-цифрового перетворювача. Частота опитування кожного каналу 280 кГц.

У гетерогенних матеріалах збудження однієї моди викликає виникнення цілого набору інших мод коливань, що поширюються різними шляхами і з різною швидкістю, і, підсумовуючись в приймачі, змінюють форму прийнятого сигналу. Найбільш інформативною є початкова частина імпульсу, вільна від паразитних мод коливань. Тому швидкість звуку в гетерогенних матеріалах вимірюють за фронтом сигналу. Довгохвильові компоненти спектра зондуємого сигналу не чутливі до неоднорідності середовища, а час їх поширення залежить від довжини бази прозвучування і характеристик середовища, зазначених вище. Оскільки зі зміною бази прозвучування спектральний склад сигналу змінюється, в основному, в високочастотному діапазоні, то можна констатувати несуттєву залежність швидкості звукових хвиль від довжини бази [9].

Швидкість розповсюдження пружних хвиль в неметалевому гетерогенному матеріалі визначається імпульсним методом за різницею в часі сигналів від віброакустичних датчиків відповідно до формули:

$$C = \frac{S}{\Delta t}, \quad (2)$$

де  $S$  – відстань між датчиками (база прозвучування), м;  $t = t_1 - t_2$  – різниця в часі сигналів від віброакустичних датчиків, с;  $t_1$  і  $t_2$  – час надходження акустичного сигналу на перший та другий датчик відповідно, с.

Розглянемо зміни форми акустичного імпульсу при проходженні через неметалевий гетерогенний матеріал. За допомогою п'єзоелектричних ультразвукових датчиків отримали два сигнали. На перший датчик надходить сигнал  $u_1(t)$ , на другий – сигнал зміненої форми  $u_2(t, C, \beta)$ , де  $\beta$  – коефіцієнт згасання пружних хвиль. Процес зміни форми сигналу можна описати співвідношенням [4]:

$$u_2(t, C, \beta) = K_1 K_2 K_3 u_1(t), \quad (3)$$

де  $K_1$  – коефіцієнт врахування впливу апаратури;  $K_2$  – коефіцієнт врахування умов вимірювання;  $K_3$  – коефіцієнт врахування акустичних характеристик матеріалу.

Оскільки умови вимірювання та апаратура, що використовується для отримання обох сигналів, однакові, то  $K_1 = K_2 = 1$ . В свою чергу, коефіцієнт  $K_3$  має фізичну сутність акустичного відображення матеріалу. Для пласкої монохроматичної пружної хвилі коефіцієнт  $K_3$  розраховується так [2, 3]:

$$K_3 = e^{-\beta S} \sin[2\pi f(t - S/C)], \quad (4)$$

де  $f$  – частота коливань, Гц.

Декремент згасання та коефіцієнт згасання коливань пов'язані співвідношенням:

$$\beta = \frac{\lambda}{T} = \lambda f, \quad (5)$$

де  $T$  – період коливань, с.

Підставивши (5) в рівняння (4), отримуємо залежність коефіцієнта  $K_3$  від параметрів матеріалу:

$$K_3 = e^{-\lambda f S} \sin \left[ 2\pi f \left( t - S / \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \right) \right]. \quad (6)$$

Враховуючи, що під час збудження коливань в неметалевих гетерогенних матеріалах виникає цілий ряд мод коливань, то вимірювальний сигнал являє собою комбінацію гармонічних компонентів, кожний з яких має свою амплітуду та частоту і поєднується в різноманітних співвідношеннях з іншими компонентами. Тому коефіцієнт врахування акустичних характеристик неметалевого гетерогенного матеріалу буде дорівнювати сумі коефіцієнтів, що характеризують зміну кожної моди коливань, тобто:

$$K_3 = \sum_{i=1}^n e^{-\lambda_i f_i S} \sin \left[ 2\pi f_i \left( t - S / \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \right) \right], \quad (7)$$

де  $i$  – кількість мод коливань в сигналі.

Тоді модель, що описує перетворення акустичної хвилі при проходженні через неметалевий гетерогенний матеріал та враховує його фізико-механічні характеристики можна, записати так:

$$u_2(t, E, \rho, \nu, \lambda) = u(t) \cdot \sum_{i=1}^n e^{-\lambda_i f_i S} \sin \left[ 2\pi f_i \left( t - S / \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \right) \right]. \quad (8)$$

Таким чином, в результаті досліджень вдалося виявити особливості формування акустичних полів в неметалевих гетерогенних матеріалах, побудована математична модель перетворення звукової хвилі під час проходження через неметалевий гетерогенний матеріал при вимірюваннях дисипативних властивостей таких матеріалів акустичним ударним методом. Основною перевагою даного методу є можливість дослідження демпфірування в різних напрямках поширення коливань, що особливо важливо для складних гетерогенних структур, в яких загасання визначається складом, розподілом фракцій за обсягом матеріалу, а також наявністю різних дефектів.

#### Список використаної літератури:

1. Барт В.Е. Опыт применения синтеграна в машиностроении / В.Е. Барт, Г.С. Санина, С.А. Шевчук // Станки и инструмент. – 1993. – № 1. – С. 15–17.
2. Безмянный Ю.Г. Акустичний контроль матеріалів з розвинутою мезоструктурою / Ю.Г. Безмянный // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2007. – № 4. – С. 53–65.
3. Безмянный Ю.Г. Акустическое отображение материалов с развитой мезоструктурой / Ю.Г. Безмянный // Акустичний вістник. – 2006. – 9, № 2. – С. 3–16.
4. Гитис М.Б. Особенности акустических измерений в сильно поглощающих средах / М.Б. Гитис, А.А. Шенкер // Дефектоскопия. – 1982. – № 10. – С. 86–94.
5. Голофеева М.А. Акустический метод контроля синтеграновых изделий // Проблемы техники : научно-вироб. журнал. – Одеса, 2013. – № 3. – С. 119–124.
6. Голофеева М.А. Метод исследования параметров качества изделий из синтеграна // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві : зб. наук. пр. – Одеса : Бахва, 2013. – Вип. 4 (5). – С. 131–135.

7. Сучасні матеріали у верстатобудуванні / П.П. Мельничук, В.Ю. Лосев, В.Г. Сніцар та ін. // Вісник ЖДТУ. – 2010. – № 1 (52). – С. 38–50.
8. Пелех Б.Л. Экспериментальные методы исследования динамических свойств композиционных структур / Б.Л. Пелех, Б.И. Саяк ; отв. ред. В.В. Васильев ; АН УССР Ин-т прикладных проблем механики и математики. – К. : Наук. думка, 1990. – 136 с.
9. Рогов В.А. Разработка изделий из синтеграна для машиностроения / В.А. Рогов. – М. : Геотехника, 2001. – 228 с.
10. Тонконогий В.М. Акустический метод измерения динамических свойств композиционных материалов / В.М. Тонконогий, М.А. Голофеева // Развитие науки и образования в современном мире : сб. науч. трудов по матер. Междунар. научно-практ. конф. (30 сент. 2014 г.). В 7 ч. – Ч. III. – М. : АР-Консалт, 2014. – С. 96–97.
11. Тонконогий В.М. Применение синтеграна в машиностроении / В.М. Тонконогий, М.А. Голофеева, И.А. Усатая // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2009. – Вып. 77. – С. 167–172.

ТОНКОНОГИЙ Володимир Михайлович – доктор технічних наук, директор Інституту промислових технологій дизайну та менеджменту Одеського національного політехнічного університету.

Наукові інтереси:

– САПР технічних систем;

– процес різання інструментами зі зносостійкими покриттями.

Тел.: 705–84–75.

E-mail: [vmt47@ukr.net](mailto:vmt47@ukr.net).

ГОЛОФЄЄВА Марина Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент Одеського національного політехнічного університету.

Наукові інтереси:

вимірювання дисипативних властивостей гетерогенних матеріалів.

E-mail: [mary\\_sya@ukr.net](mailto:mary_sya@ukr.net).

ПЕРПЕРІ Алла Олександрівна – кандидат технічних наук, завідувач кафедри Одеської державної академії будівництва та архітектури.

Наукові інтереси:

– САПР технічних систем;

– математичне моделювання;

– еволюційна оптимізація технологічних процесів із зв'язаними операціями в САПР.

E-mail: [a\\_perperi@ukr.net](mailto:a_perperi@ukr.net).

НЕМЧЕНКО Ольга Володимирівна – студентка Одеського національного політехнічного університету.

Наукові інтереси:

– вимірювань дисипативних властивостей неметалевих гетерогенних матеріалів.

Стаття надійшла до редакції 27.08.2015