

## ВИКОРИСТАННЯ АКУСТИЧНОГО РЕЗОНАНСУ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПРИХОВАНИХ ДЕФЕКТІВ У ПОЛІМЕРНИХ ШАРУВАТИХ КОМПОЗИТАХ

З. Т. Назарчук<sup>1</sup>, Т. І. Вороняк<sup>1</sup>, О. Г. Куць<sup>1</sup>, І. В. Стасишин<sup>1</sup>,  
І. Б. Івасенко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

<sup>2</sup> Національний університет “Львівська політехніка”, Львів

E-mail: voroniak.taras@hotmail.com

Запропоновано спосіб неруйнівного контролю, який поєднує акустичне навантаження об'єкта контролю та інтерферометричний моніторинг переміщень його поверхні внаслідок резонансу акустичної хвилі в прихованому дефекті. Спосіб спрямований на виявлення та ідентифікацію підповерхневих дефектів в елементах конструкцій, що виготовлені з полімерних шаруватих композитних матеріалів або містять захисні лакофарбові покриття. При цьому дефект розглядають як акустичний резонатор, заповнений середовищем, в якому поширюється лише поздовжня акустична хвиля. Найчастіше такими середовищами є повітря або вода. Новизна способу в тому, що він дає змогу не тільки виявити прихований дефект і встановити місце знаходження, а й визначити його розміри. Наведено схему експериментальної установки для його реалізації та описана методика її використання.

**Ключові слова:** прихований дефект, акустична хвиля, акустичний резонанс, полімерні шаруваті композити, електронна спекл-інтерферометрія.

## USE OF ACOUSTIC RESONANCE FOR DETECTION AND IDENTIFICATION OF HIDDEN DEFECTS IN POLYMER LAYERED COMPOSITES

Z. T. Nazarchuk<sup>1</sup>, T. I. Voronyak<sup>1</sup>, O. G. Kuts<sup>1</sup>, I. V. Stasyshyn<sup>1</sup>,  
I. B. Ivasenko<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv

<sup>2</sup> Lviv Polytechnic National University, Ukraine, Lviv

A method of non-destructive testing is proposed, which combines the acoustic load of the object of inspection and interferometric control of its surface displacements, formed as a result of an acoustic wave resonance in a hidden defect. The method is aimed at solving the problem of detection and identification of subsurface defects formed in structural elements made of polymer layered composite materials or contain protective paint coatings. At the same time, the defect is considered as an acoustic resonator filled with a medium in which only a longitudinal acoustic wave propagates. Usually such media are air or water. The novelty of the method is that it allows us not only to detect a hidden defect and establish its location, but also to determine its dimensions. The scheme of the experimental installation is given and the method is described. The research of the detection and identification of subsurface defects that most often occur in practice is conducted with the help of the model of the experimental installation. In products made of polymer layered composites, such defects are unbounded areas between layers during construction, internal damages such as cracks and areas of crumpling during its operation. The results of the experiments prove the effectiveness of the proposed method. The described method is also suitable for detection and identification of blistering of protective paint coatings, provided that they are filled with liquids or gases in which transverse acoustic waves do not propagate.

**Keywords:** hidden defect, acoustic wave, acoustic resonance, polymer layered composites, electronic speckle interferometry.

**Вступ.** Запропоновано спосіб неруйнівного контролю для виявлення прихованих (підповерхневих) дефектів (ПД) у полімерних шаруватих структурах, зокрема, в шаруватих композитних матеріалах (ШКМ), які широко використовують у різних галузях промисловості (суднобудуванні, транспортному машинобудуванні, цивільному будівництві тощо). Через високу міцність, жорсткість, корозійну і жаротривкість, а також малу густину їх найчастіше застосовують в авіакосмічній галузі. Під час створення сучасних літальних апаратів частка полімерних композитних елементів конструкцій стрімко зростає [1, 2]. Хоча проблемою виявлення та ідентифікації ПД у елементах конструкцій сучасних виробів з ШКМ займаються десятиліття, проте вона залишається надзвичайно актуальною [3–6]. До найнебезпечніших ПД належать місця непроклеювання між шарами під час виготовлення конструкцій та розшарування, внутрішні пошкодження типу тріщин та області змінання під час її експлуатації. Традиційні ультразвукові способи контролю тут малоефективні через складні механізми поширення, трансформації та заганання акустичних хвиль (АХ) у ШКМ [7, 8]. Адже в них одночасно можуть існувати фактично всі відомі типи АХ (поздовжні, поперечні, Релея, Лемба [7–9]) з відповідними швидкостями поширення, що відрізняються в рази.

Відомі способи та пристрої виявлення ПД у зразках ШКМ та елементах конструкцій, що поєднують їх опромінення АХ та контроль переміщень поверхні оптичними засобами за дії цього опромінення [3–6, 9, 10]. Проте задача ідентифікації ПД (встановлення розміру та форми) залишається нерозв'язаною.

Пропонуємо спосіб неруйнівного контролю ШКМ, що дає змогу за мінімальних затрат часу виявляти, локалізувати та ідентифікувати ПД, а також класифікувати їх за розмірами на ділянці спостереження. Цього досягають шляхом встановлення взаємозв'язків між розмірами ПД та частотою АХ опромінення ШКМ і полем переміщення його поверхні, за яких дефект проявляється. Спосіб ґрунтується на гіпотезі, що ПД у ШКМ – акустичний резонатор, заповнений повітрям (найпоширеніший випадок). Він проявиться на поверхні за утворення нерухомої (стоячої) АХ (резонансу). Перевага такої гіпотези в тому, що в повітрі (в середині ПД) поширюється лише поздовжня АХ, швидкість якої відома [7, 9]. Спосіб ефективний і за умов, коли ПД заповнений іншими газами чи рідинами, тобто середовищем, в якому поширюється тільки поздовжня АХ з відомою швидкістю.

Обґрунтуємо запропоновану гіпотезу та її використання для контролю ШКМ.

**Створення акустичного резонансу в прихованому дефекті.** Відомо, що умовою виникнення резонансу на довжині пробігу  $d$  (довжині резонатора – прямий і зворотний шлях) уздовж напрямку поширення хвилі  $x$  фазовий зсув між біжучою та відбитою хвилями має бути кратним  $2\pi$  [7, 9]. Іншими словами, стояча хвиля (СХ) виникає, якщо довжина  $d$  кратна половині довжини хвилі  $\lambda$ , тобто за умови

$$d = N \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

де  $N = 1, 2, 3, \dots$  (кількість мод). Під час поширення АХ протилежні межі резонатора мають бути однотипними – або акустично м'якими, або жорсткими [9]. Також відомо, що за присутності в середовищі СХ є точки, де амплітуда коливань  $A$  рівна нулю (*вузли СХ*), та точки, в яких коливання мають максимальну амплітуду (*вигуди* або *моди / антимоди*) (див. рис. 1).

Якщо врахувати зв'язок між довжиною хвилі  $\lambda$ , її частотою  $f$  та швидкістю поширення  $v$

$$\lambda = \frac{v}{f},$$

то умова резонансу **Помилка! Джерело посилання не знайдено.** матиме вигляд

$$d = N \frac{v}{2f}. \quad (2)$$

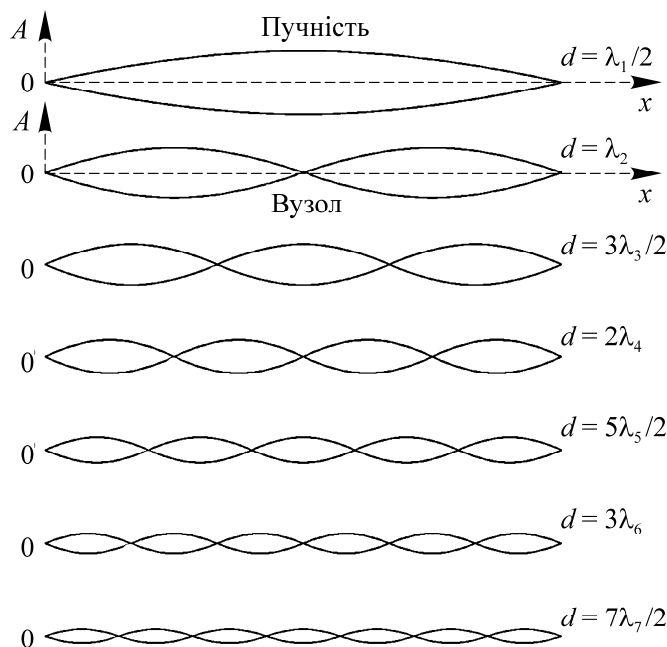


Рис. 1. Вузли та видуги СХ.

Таким чином, якщо відомий розмір резонатора  $d$  (чи його очікуваний розмір), то можна розрахувати частоти хвиль  $f_N$ , за яких виникатиме резонанс:

$$f_N = \frac{Nv}{2d}. \quad (3)$$

Оскільки, згідно зі запропонованою гіпотезою, ПД у ШКМ – акустичний резонатор, заповнений повітрям, то для визначення його розміру  $d$  згідно з рівнянням (2) необхідно встановити (порахувати) лише кількість мод  $N$  для СХ з частотою  $f_N$ . Адже найчастіше величину  $f_N$  контролюють (або задають з комп'ютера), а швидкість АХ у повітрі  $v$  відома ( $\sim 340$  м/с за температури  $20^\circ\text{C}$ ). За резонансу максимальні переміщення поверхні над (та під) ПД у ШКМ відповідатимуть модам СХ. Таким чином, для ідентифікації ПД система контролю переміщень поверхні ШКМ повинна бути достатньо чутлива, щоб ці моди розрізнити та встановити їх кількість.

**Реалізація способу виявлення прихованих дефектів за акустичного резонансу.** Згідно з літературними даними [6, 10, 12], поверхня ШК уздовж своєї нормалі над ПД за його виявлення під час опромінення АХ переміщується приблизно на 10...50 нм. Для контролю та аналізу таких переміщень зазвичай використовують ширографи, спекл-інтерферометри та лазерні віброметри [4, 5, 11–15]. Серед них спекл-інтерферометри – високочутливі та контролюють переміщення лише за одним (вибраним) напрямом [13], як і лазерні віброметри, а також одночасно – на значній ділянці поверхні, як і ширографи. Ця особливість важлива під час виявлення ПД, адже АХ спричиняє деформаційні переміщення поверхні ШКМ за трьома координатами, але найінформативнішими з них є лише вздовж нормалі до поверхні [16].

Для реалізації поданого способу розробили експериментальну установку (ЕУ), побудовану на основі спекл-інтерферометра (рис. 2). У ній промінь від лазера 1 пронизує оптичну заслінку 2, що відкривається за сигналом з блока керування 9, збільшується за діаметром (відповідно до розмірів ділянки контролю) за допомогою розширювача 3 та потрапляє на світлоподільник 4, який ділить його на два промені однакової інтенсивності. Один з цих променів освітлює ділянку поверхні ШКМ (об'єкт контролю) 5, а інший – опорне дзеркало 7. Відбившись від об'єкта контролю та опорного дзеркала, ці промені знов потрапляють на світлоподільник, поширюються в одному напрямку до фотокамери 8, за допомогою якої та комп'ютера 11 реєструють результат їх когерентної взаємодії, тобто спекл-інтерферограму (СІ) поверхні ШКМ [13, 17, 18].

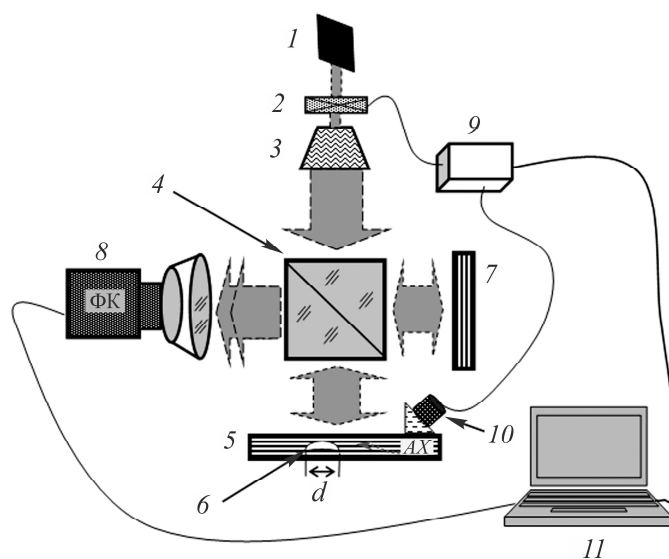


Рис. 2. Схема експериментальної установки: 1 – одномодовий лазер; 2 – оптична заслінка; 3 – розширювач лазерного променя; 4 – світлоподільник; 5 – об'єкт контролю (зразок ШКМ чи елемент конструкції з дефектом 6); 7 – опорне дзеркало (відбивач); 8 – цифрова фотокамера; 9 – блок керування оптичною заслінкою 2 та випромінювачем АХ 10 (п'єзоелектричний перетворювач з призмою); 11 – комп'ютер.

Для виявлення ПД за допомогою такої ЕУ найперше реєстрували початкову СІ поверхні ненавантаженого (неопроміненого АХ) ШКМ (див. рис. 3а). Розподіл інтенсивності (попільсьельно)  $I_0$  тут описує відомий вираз [17]

$$I_0 = i_1 + i_2 + 2\sqrt{i_1 i_2} \cos(\psi), \quad (4)$$

де  $i_1, i_2$  – розподіли інтенсивності (попільсьельно) предметного (відбитого від поверхні ШКМ 5) та опорного (відбитого від поверхні опорного дзеркала 7) променів;  $\psi$  – різниця фаз між цими променями (також різна для кожного пікселя).

Наступну СІ реєстрували за опромінення ШКМ АХ (див. рис. 3б). Розподіл інтенсивності (попільсьельно)  $I_1$  у другій СІ

$$I_1 = i_1 + i_2 + 2\sqrt{i_1 i_2} \cos(\psi + \Delta\varphi_z), \quad (5)$$

де  $\Delta\varphi_z$  – додаткова різниця фаз між променями, зумовлена переміщенням деформованої поверхні ШКМ  $\Delta h_z$  уздовж її нормалі (осі  $z$  на рис. 3). Зв'язок між величинами  $\Delta\varphi_z$  та  $\Delta h_z$  описує вираз [13, 17]

$$\Delta\varphi_z = \frac{2\pi\Delta h_z (1 + \cos\theta_z)}{\lambda_c}, \quad (6)$$

де  $\theta_z$  – кут падіння лазерного (предметного) променя на поверхню ШКМ (див. рис. 3);  $\lambda_c$  – довжина його хвилі (найчастіше використовують однододові лазери з  $\lambda_c = 450 \dots 650$  нм).

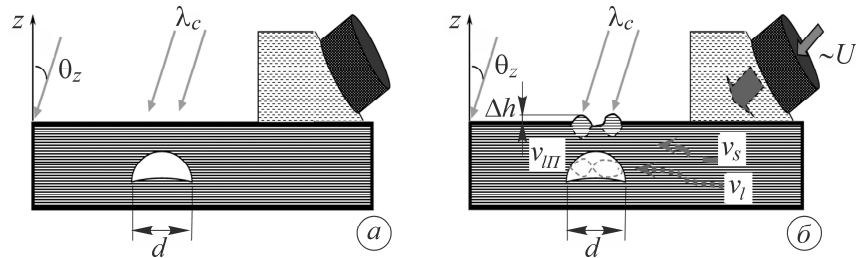


Рис. 3. Умови реєстрування двох послідовних СІ поверхні ШКМ: *a* – без опромінення АХ; *б* – за опромінення;  $v_s$  та  $v_l$  – швидкості відповідно поперечної та поздовжньої АХ, що поширюються в ШКМ;  $v_{III}$  – швидкість поздовжньої АХ, що поширюється в ПД (повітрі).

За різницею  $|I_1 - I_0|$  визначають значення  $\Delta\varphi_z$ , а потім згідно з (6) – і  $\Delta h_z$ . Двовимірна картина  $|I_1 - I_0|$ , або різницеву СІ (РСІ) має вигляд смуг, кожна з яких відповідає відносному переміщенню деформованої поверхні:

$$\Delta h_z^1 = \frac{\lambda_c}{1 + \cos \theta_z}.$$

Якщо ж лазерний (предметний) промінь падає на поверхню вздовж нормалі ( $\theta_z = 0$  – найвища чутливість оптичної схеми), то одна смуга на РСІ відповідає переміщенню поверхні

$$\Delta h_z^1 = \frac{\lambda_c}{2}.$$

Розділивши цю смугу, наприклад, на 100 частин (градацій сірого), отримують поле переміщень поверхні з похибкою, що не перевищує кількох нанометрів [16–18]. Тобто чутливість спекл-інтерферометра достатня для контролю переміщень поверхні ШКМ над (чи під) ПД за резонансу АХ.

**Методика виявлення та ідентифікації прихованих дефектів за резонансу.** Для цього необхідно:

- ділянку поверхні ШКМ (зразка) освітити розширеним променем від когерентного джерела оптичного випромінювання (лазера);
- за допомогою інтерферометра, цифрової фотокамери та комп'ютера (див. рис. 2) зареєструвати початкову СІ цієї ділянки СІ<sub>0</sub>;
- ШКМ опромінити гармонічною АХ, частоту  $f$  якої плавно змінювати;
- для кожної частоти  $f_n$ , яку контролюють, зареєструвати відповідну СІ<sub>*n*</sub> та сформулювати РСІ<sub>*n*</sub> =  $|СІ<sub>*n*</sub> - СІ<sub>0</sub>|$  (картину смуг чи плям, що відповідають однаковим переміщенням поверхні вздовж її нормалі після опромінення АХ) і проаналізувати її, щоб виявити світлі плями (моди стоячої АХ) на темному фоні;
- порахувати кількість світлих плям, що розташовані над ПД  $N$  (мод стоячої АХ), де  $N = 1, 2, 3 \dots$ ;
- визначити розмір дефекту за формулою

$$d = \frac{Nv}{2f_n}, \quad (7)$$

де  $v$  – швидкість поширення АХ у повітрі.

У поле зору оптичної системи можуть потрапити одночасно декілька ПД, що мають, наприклад, кратні розміри  $d$ ;  $2d$ ;  $3d$  тощо. Тоді всі вони проявлятимуться на резонансній частоті, наприклад  $f_0$ , проте кількість мод  $N$  для кожного з них бу-

де відповідно 1; 2; 3 (див. рис. 4). Тобто, якщо для ПД з розміром  $d$  частота  $f_0$  буде основною резонансною (перша гармоніка), то для дефектів з розмірами  $2d$  і  $3d$  – частоти  $2f_0$  та  $3f_0$ . Таким чином, запропонований спосіб дає можливість одночасно виявити, локалізувати та ідентифікувати кілька ПД.

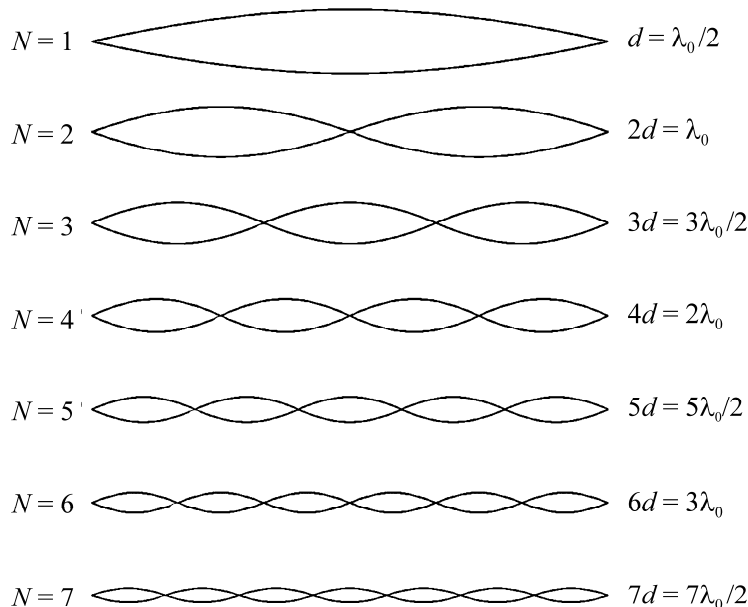


Рис. 4. Кількість мод СХ у дефектах з кратними розмірами за однієї частоти АХ  $f_0$ .

Для виявлення ПД певних (очікуваних) розмірів, наприклад  $d_1$ , за формулою (7) можна розрахувати частоту  $f_1$  АХ опромінення зразка або вузьку смугу таких частот і суттєво скоротити час контролю. Для розрахунку основних резонансних частот ( $N = 1$ ) під час пошуку ПД заданих розмірів  $d_1$  ця формула матиме вигляд

$$f_1 = \frac{v}{2d_1}, \quad (8)$$

а для виявлення ПД з розмірами  $d_1 \pm \Delta d$  смуга частот АХ

$$(f_1 \pm \Delta f) = \frac{v}{2(d_1 \pm \Delta d)}. \quad (9)$$

Формули (7)–(9) є робочими під час застосування запропонованої методики виявлення та ідентифікації ПД у ШКМ.

Під час реєстрації початкової  $СI_0$  сигнал з блока керування 9 (див. рис. 2) подавали лише на оптичну заслінку 2, а під час реєстрації  $СI_n$  – синхронно на заслінку та генератор АХ 10. За допомогою комп'ютера 11 синхронізували роботу модулів 9 і 8, реєстрували та обробляли  $СI$ , а також візуалізували РСІ.

**Експериментальні результати.** За допомогою макета ЕУ виконано серію експериментів з виявлення та ідентифікації ПД в листових ШКМ, виготовлених зі склотекстоліту та вуглепластикового (карбонового) волокна різної товщини (різної кількості їх шарів та геометрії армування). Зокрема, досліджували ділянки дефектного клейового з'єднання (непроклеювання) між шарами, тріщин, глухих отворів та областей розшарувань і змінання. Для поліпшення відбивально-розсіювальної характеристики на поверхню зразків наносили порошкові проявники чи інспекційні аерозолі білого або сріблястого кольорів. Це дало можливість одночасно контролювати поверхню розміром  $50 \times 50 \text{ мм}^2$ , використовуючи лазери не-

ликої потужності (до 10 мВт). За потужності > 50 мВт така підготовка поверхні не потрібна, і ЕУ здатна контролювати поверхні з більшими за 50×50 мм<sup>2</sup> розмірами та довільними відбивально-розсіювальними характеристиками.

Запропонований спосіб дав змогу за мінімальних часових затрат та з вірогідністю > 80% виявити та ідентифікувати всі вищезгадані типи ПД. При цьому вказана процедура мала свою, хоч і незначну, специфіку. Під час експерименту велику увагу приділяли синхронізації роботи джерела АХ і відеокамери (момент реєстрації СІ та час експозиції). Адаже з часом через накладання відбитих АХ від різних шарів, що мають неоднакову фазу та амплітуду, значно згладжується (розмивається) резонансний ефект у ПД. Крім того, в листових зразках ШКМ продовжуваті форми виникають хвилі Лемба, які можуть також його маскувати.

Щоб виявити місце тріщини, виготовили спеціальний зразок з дев'ятишарового карбонового композиту загальною товщиною 3 мм, в якому механічно на всю ширину наносили тріщину. Після завершення експериментів зразок розрізали для візуального дослідження пошкодження в околі тріщини [19].

Нагадаємо, що місце тріщини проявилось за частот АХ 25...70 кГц, причому РСІ для різних частот також відрізнялися. Це можна пояснити тим, що під час підготовки зразка появи тріщини передували розшарування між фактично всіма його шарами, площа яких була різною, тому, очевидно, кожне з них проявлялося на своїй резонансній частоті. При цьому для розшарувань у верхніх шарах спостерігали чіткий модовий склад СХ, а для глибших шарів картини на РСІ були менш контрастні [19]. Можливо, надалі за ступенем розмиття (контрасту) картин на РСІ вдається визначити глибину залягання ПД. Але для цього необхідні додаткові дослідження кожного типу (зразка) ШКМ.

Для порівняння у праці [19] також наведені результати виявлення такої ж прихованої тріщини за допомогою спекл-інтерферометра під час теплового навантаження зразка. ПД також чітко проявлявся на РСІ, проте для реалізації такого способу потрібно затратити більше часу. Крім того, він не надає інформацію про розміри та форми об'єкта ПД.

### **ВИСНОВКИ**

Запропоновано спосіб неруйнівного контролю полімерних ШКМ, що дає змогу за мінімальних затрат часу виявляти, локалізувати та ідентифікувати їх ПД. Він ґрунтується на гіпотезі, що ПД у ШКМ – акустичний резонатор, заповнений повітрям. ПД проявиться на поверхні за утворення в ньому нерухомої (стоячої) АХ. Перевага такої гіпотези в тому, що в повітрі (в середині ПД) поширюється лише поздовжня АХ, швидкість якої відома.

Встановлено взаємозв'язки між розмірами ПД та частотою АХ опромінення зразка і переміщеннями його поверхні, за яких ПД проявляється. Наведено вирази для ідентифікації ПД та запропоновано схему оптико-акустичної системи для експериментальної реалізації способу. Розроблено відповідну методику виявлення та ідентифікації ПД у ШКМ за резонансу АХ. Описано особливості експериментальної апробації способу за виявлення та ідентифікації ПД у зразках, виготовлених зі склотекстоліту та вуглепластика, з технологічними та експлуатаційними ПД: ділянки дефектного клейового з'єднання (непроклеювання) між шарами; тріщини; глухі отвори; ділянки розшарувань і змінання.

Описаний спосіб придатний для виявлення та ідентифікації інших ПД (наприклад, відшарувань захисних лакофарбових покриттів) за умови, що вони заповнені рідинами або газами (середовищем, у якому не поширюються поперечні АХ).

За потреби детальнішого визначення форми ПД цим способом, корисними, на нашу думку, також будуть дослідження, описані в праці [20].

1. Deo, R.B.; Starnes, J.H.; Holzwarth, R.C. Low-cost composite materials and structures for aircraft applications. In: RTO Meeting Proceedings RTO-MP-069(II). NATO Research and Technology Organisation (RTO), 2003, 1–11.
2. Mrazova, M. Advanced composite materials of the future in aerospace industry. *Incas bulletin*, **2013**, 5.3: 139. <https://doi.org/10.13111/2066-8201.2013.5.3.14>
3. Riegert, G.; Pfeleiderer, K.; Gerhard, H.; Solodov, I.; Busse, G. Modern Methods of NDT for Inspection of Aerospace Structures, In Proceedings of 9<sup>th</sup> European Conference on NDT, September 2006, Berlin, Germany, We.4.1.4, pp. 1–11.
4. Fomitchov, P.; Wang, L.-S.; Krishnaswamy, S. Advanced Image-Processing Techniques for Automatic Nondestructive Evaluation of Adhesively-Bonded Structures Using Speckle Interferometry. *J. of Nondestructive Evaluation*, **1997**, 16, 215–227. <https://doi.org/10.1023/A:1021848031529>
5. Chuang, K.-C.; Lin, S.-H.; Ma, C.-C. Efficient excitation of transverse vibrational modes using improved configurations of PFCs connected to an isotropic plate, *Composite Structures*, **2021**, 265, 113718. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113718>
6. Solodov, I.; Bernhardt, Y.; Kreutzbruck, M. Resonant Airborne Acoustic Emission for Nondestructive Testing and Defect Imaging in Composites. *Appl. Sci.*, **2021**, 11, 10141. <https://doi.org/10.3390/app112110141>
7. Ida, N.; Meyendorf, N. Handbook of Advanced Nondestructive Evaluation, Springer Nature Switzerland AG, 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26553-7>
8. Kino, G.S. Acoustic Waves: Devices, Imaging and Analog Signal Processing. Prentice-Hall, Inc. A Division of Simon & Schuster Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.
9. Galagan, R.M. Theoretical foundations of ultrasonic non-destructive testing. National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2019. [in Ukrainian]
10. Li, F.; Peng, H.; Sun, X.; Wang, J.; Meng, G. Wave Propagation Analysis in Composite Laminates Containing a Delamination Using a Three-Dimensional Spectral Element Method, *Mathematical Problems in Engineering*, **2012**, 659849. <https://doi.org/10.1155/2012/659849>
11. Gerhard, H., Busse, G. Two new techniques to improve interferometric deformation-measurement: Lockin and Ultrasound excited Speckle-Interferometry. Osten, W. Ed., *Fringe*, Springer, Berlin, Heidelberg, **2005**, 530–538. [https://doi.org/10.1007/3-540-29303-5\\_70](https://doi.org/10.1007/3-540-29303-5_70)
12. Hosoya, N.; Yoshinaga, A.; Kanda, A.; Kajiwara, I. Non-contact and non-destructive Lamb wave generation using laser-induced plasma shock wave. *International Journal of Mechanical Sciences*, **2018**, 140, 486–492. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.03.023>
13. Wang L.-S.; Krishnaswamy, S. Additive-subtractive speckle interferometry: Extraction of phase data in noisy environments. *Opt. Eng.*, **1996**, 35(3), 794–801. <https://doi.org/10.1117/1.600649>
14. Wiciak, P. Quality Assessment of Composite Materials using Ultrasonic Non-Destructive Testing Methods, UWSpace, 2020.
15. Derusova, D.A.; Vavilov, V.P.; Sfarra, S.; Sarasini, F.; Druzhinin, N.V. Applying ultrasonic resonance vibrometry for the evaluation of impact damage in natural/synthetic fibre reinforced composites. *Polymer Testing*, **2018**, 68, 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.03.053>
16. Voronyak, T.I.; Kmet', A.B.; Muravs'kyi, L.I. Determination of the 3D fields of displacements by the method of phase-shifting speckle interferometry. *Materials Science*, **2009**, 45(3), 372–377. <https://doi.org/10.1007/s11003-009-9201-8>
17. Jones, R.; Wykes, C. Holographic and Speckle Interferometry, 2nd ed. Cambridge University Press., 1989, 140–141. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511622465>
18. Muravsky, L.; Kmet', A.; Voronyak, T. Two approaches to the blind phase shift extraction for two-step electronic speckle pattern interferometry. *Opt. Eng.*, **2013**, 2(10), 101909. <https://doi.org/10.1117/1.OE.52.10.101909>
19. Lobanov, L.M.; Muravs'kyi, L.I.; Pivtorak, V.A.; Voronyak, T.I.; Monitoring of the Stressed State of Structural Elements with the Use of Electromagnetic Waves of Optical Range, in: Nazarchuk, Z.T. Ed., Technical Diagnostics of Materials and Structures: A Handbook [in Ukrainian], Vol. 3, Prostir-M, 2017, ISBN 978-617-7501-37-3.
20. Rona, A. The acoustic resonance of rectangular and cylindrical cavities. *Journal of Algorithms & Computational Technology*, **2007**, 1(3), 329–356. <https://doi.org/10.1260/174830107782424110>

Одержано 04.10.2022