

## ВИЯВЛЕННЯ ПЛАНАРНИХ ПІДПОВЕРХНЕВИХ ДЕФЕКТІВ У СКЛОПЛАСТИКОВИХ КОМПОЗИТНИХ ПАНЕЛЯХ ОПТИКО-АКУСТИЧНИМ МЕТОДОМ

Л. І. Муравський, О. Г. Куць, Г. І. Гаськевич

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

E-mail: muravskyleon@gmail.com

Проаналізовано оптико-акустичний метод виявлення підповерхневих дефектів у шаруватих композитних структурах, який базується на новому підході формування та візуалізації модової структури коливань розташованого безпосередньо над дефектом тонкого шару матеріалу (області інтересу) на частотах, які відповідають резонансним частотам тонкої закріпленої по краях мембрани, збудженої згинальними ультразвуковими (УЗ) хвилями. Для технічної реалізації методу створено експериментальний макет гібридної оптико-цифрової системи, в якому зразки шаруватих композитів збуджено гармонічним УЗ випромінюванням у режимі частотної розгортки в діапазоні 5÷150 кГц. Досліджено шаруваті склопластикові панелі із квадратними і круглими планарними підповерхневими дефектами. Виконано серію експериментів із виявлення квадратних дефектів розмірами 20×20 мм<sup>2</sup>, розташованих у панелях на різних глибинах залягання. Встановлено, що просторові відгуки від дефектів відповідають модовій структурі вузлів прямокутної мембрани на її фундаментальній та кратних резонансних частотах. Отримано залежності між глибиною залягання дефектів та їх резонансними частотами, які свідчать про монотонне зростання цих частот зі збільшенням глибини залягання дефекту. На основі порівняльного аналізу цих залежностей з теоретичними проаналізовано основні причини відхилень експериментальних результатів від фундаментальної і кратних резонансних частот для квадратного підповерхневого дефекту, отриманих за відомими формулами.

**Ключові слова:** підповерхневий дефект, оптико-акустичний метод, область інтересу, резонансні частоти, тонка мембрана, ультразвукове збудження.

## DETECTION OF PLANAR SUBSURFACE DEFECTS IN FIBERGLASS PLASTIC COMPOSITE PANELS BY OPTICAL-ACOUSTIC METHOD

L. I. Muravsky, O. G. Kuts, G. I. Gaskevych

H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv

An optical-acoustic method for detecting subsurface defects in laminated composite structures is considered. The method is based on a new approach to detecting such defects by forming and visualizing the mode structure of oscillations of a thin layer of material (region of interest (ROI)) located directly above the defect. The oscillations of the ROI occur at frequencies corresponding to the resonant frequencies of an edge-clamped thin membrane excited by flexural ultrasonic (US) waves. To technically implement the method, an experimental breadboard of a hybrid optical-digital system is created, in which laminated composite specimens are excited by harmonic US radiation in the frequency sweep mode in the range of 5÷150 kHz. For research, laminated fiberglass panels with square and round planar subsurface defects are used. A series of experiments is carried out to detect square defects with dimensions of 20×20 mm<sup>2</sup> located in composite panels at different depths. It is shown that spatial responses from defects correspond to the mode structure of the nodes of a rectangular membrane at its fundamental and multiple resonant frequencies. Dependences between the depth of the defects and their resonant frequencies are obtained. They indicate a monotonous increase in resonant frequencies with an increase in the depth of the defect. The main reasons for the deviations of the experimental results from the values of calculating the fundamental and multiple frequencies for the planar square subsurface defect using known formulas are analyzed.

© Л. І. Муравський, О. Г. Куць, Г. І. Гаськевич, 2022

**Keywords:** *subsurface defect, optical-acoustic method, region of interest, resonant frequencies, thin membrane, ultrasonic excitation.*

**Вступ.** Композитні матеріали часто використовують у машинобудуванні, авіакосмічній техніці, будівництві та інших галузях індустрії. Однак через наявність декількох компонент з різними фізико-хімічними і механічними характеристиками у них формуються технологічні і експлуатаційні підповерхневі дефекти: розшарування, непростеї, тріщини, відшарування, порожнечі, включення, розтріскування матриці тощо, які слід виявити [1, 2]. Для цього існує низка методів неруйнівного контролю (НК). Серед них одне з чільних місць займають оптико-акустичні, де композитну структуру збуджують УЗ хвилями, а її поверхню зондують за допомогою оптичного випромінювання. Ці методи можна умовно поділити на два основні напрями. У першому використовують сканувальний лазерний промінь для моніторингу композитної поверхні, збудженої УЗ хвилями. Перспективним тут є метод резонансної спектроскопії, де кожен пункт поверхні досліджуваного зразка сканують лазерним віброметром [3, 4]. Він базується на концепції локального резонансу дефектів (ЛРД) і дає можливість виявляти підповерхневі дефекти на їх резонансних частотах. Швидкість методу невисока, оскільки лазерний промінь послідовно сканує всю ділянку досліджуваної поверхні. Другий напрям застосовує освітлення розширеним лазерним променем збудженої ділянки поверхні для запису картин інтерференційних або кореляційних смуг (ІКС), тобто спекл-інтерферограм, широгам і голограм. Тут найбільш відомі методи адитивно-субтрактивної електронної спекл-інтерферометрії (ЕСІ)/ширографії [5, 6], синхронізованої ЕСІ з відновленням еталона [7] та усередненої у часі цифрової голографії [8], для виявлення підповерхневих дефектів. Однак оптико-цифрові системи, розроблені для реалізації цих методів, чутливі до зовнішніх вібрацій та теплових потоків. Тому їх застосування у натурних умовах проблематичне, якщо не брати до уваги широкографічного методу. Крім того, в усіх цих системах існує декореляція спеклів, що не дає змоги виявляти порівняно великі дефекти через низький контраст картин ІКС або через їх повну відсутність.

**Оптико-акустичний метод виявлення підповерхневих дефектів у композитах.** Цей метод для виявлення і локалізації підповерхневих дефектів у шаруватих композитах, що збуджуються УЗ хвилями, запропоновано і розроблено раніше [9–11]. Його реалізують за допомогою гібридної оптико-цифрової системи (ГОЦС), у якій лише один розширений предметний лазерний пучок освітлює шорстку поверхню композиту за допомогою оптичної системи. Шорсткість поверхні може бути природною, однак, якщо вона гладка, то її фарбують, розпилюючи відповідний спрей, щоб сформувати штучну шорсткість. Зареєстровані цифровою камерою динамічні спекл-зображення, заздалегідь сформовані в оптичній системі, обробляють у комп'ютері і синтезують мапу дефектів, яка відтворює приблизні розміри і розташування тих пошкоджень, що потрапили у поле зору камери. На відміну від оптико-цифрових систем, що реалізують згадані вище методи ЕСІ/ширографії [5–7] та цифрової голографії [8], у ГОЦС відсутній опорний промінь. Тому суттєво спрощується конструкція оптичної схеми та підвищується стійкість ГОЦС до зовнішніх вібрацій та теплових потоків, що дає змогу використовувати її в натурних умовах.

Метод має деякі спільні риси з іншими методами лазерної спекл-візуалізації, де використовують нахил ділянки поверхні під час аналізу вібрацій і теплових напружень у балках, мембранах та інших зразках матеріалів та елементах конструкцій. Такі методи ґрунтуються на декореляції спеклів нахилених рухомих шорстких поверхонь [12–14]. Однак вони не виявляють дефекти у композитних, метало-композитних чи металевих елементах конструкцій. Продемонстровано здатність декореляції спеклів внаслідок нахилу поверхні виявляти підповерхне-

вий дефект у вуглецево-епоксидному шаруватому композиті [15]. Проте для цього необхідні потужна інфрачервона лампа та лазер, що істотно обмежує можливість його застосування як у лабораторних, так і в натурних умовах.

У розробленому оптико-акустичному методі поєднано процедуру накопичення початкових спекл-зображень для підвищення інтенсивності сигналів у кінцевій мапі дефектів із декореляцією спеклів у локальному спекл-зображенні (ЛСЗ), яке формує нахилена ділянка вібрвальної поверхні композиту, розташована безпосередньо над дефектом. Її називатимемо областю інтересу (ОІ). Через декореляцію спеклів у межах ЛСЗ відбуваються їх розмиття та зміна контрасту, в результаті чого на мапі формується світловий відгук від дефекту, який різко виділяється на темному фоні, що оточує його, оскільки за межами ОІ вібрації поверхні практично відсутні, а отже, і розмиття.

Проаналізуємо вплив переміщень ОІ від площини, тобто перпендикулярно до площини композиту. ОІ розташована у вхідній площині оптичної системи формування спекл-зображення (рис. 1). Нехай ОІ та її просторовий елемент, який нахилється під час вібрації, мають плоску шорстку поверхню до збудження її УЗ хвилею. Поверхня ОІ збігається з плоскою поверхнею композитної пластини, а її шорсткість така ж, як і поверхні пластини. Поверхню композиту освітлюють паралельним хвильовим фронтом оптичного когерентного випромінювання, що падає на неї під кутом  $\theta$ . Комплексні амплітуди частини ЛСЗ, утвореної цим елементом ОІ перед і під час нахилу в площині зображення, можна відповідно описати так:

$$\tilde{a}(\mathbf{r}) = \tilde{g}(\mathbf{r}) \otimes h(\mathbf{r}), \quad (1)$$

$$a(\mathbf{r}) = g(\mathbf{r}) \exp(-j2\pi\Delta\mathbf{v}\mathbf{r}) \otimes h(\mathbf{r}), \quad (2)$$

де  $\mathbf{r} = (x, y)$ ,  $\Delta\mathbf{v} = (\Delta v_x, \Delta v_y)$  – зміна просторової частоти, що відповідає зсуву амплітудного спектра у площині апертури об'єктива;  $h(\mathbf{r})$  – функція розсіяння точки оптичної системи проектування зображення;  $\otimes$  – символ операції згортки.

Фур'є-образ від функції  $a(\mathbf{r})$ , що описує вираз (2), тобто під час нахилу елемента ОІ, має вигляд

$$A(\mathbf{v}) = G(\mathbf{v} + \Delta\mathbf{v}) H(\mathbf{v}), \quad (3)$$

де  $H(\mathbf{v}) = F(\mathbf{r})$  – функція зіниці апертури об'єктива;  $A(\mathbf{v}) = F[a(\mathbf{r})]$ ;  $G(\mathbf{v}) = F[g(\mathbf{r})]$ ,  $F$  – символ двовимірного перетворення Фур'є. Отже, як свідчать формули (2) і (3), зсув спектра просторових частот у площині апертури об'єктива викликаний нахилом елемента ОІ.

У праці [16] встановили лінійну залежність зсуву просторової частоти  $\Delta\mathbf{v}$  від кута нахилу  $\beta$  поверхні об'єкта дослідження, яку описує вираз

$$\Delta\mathbf{v} = \frac{1 + \cos\theta}{\lambda} \cdot \frac{1}{M_l} \beta. \quad (4)$$

Тут  $\lambda$  – довжина хвилі лазерного випромінювання;  $\theta$  – кут його падіння;  $M_l$  – лінійне збільшення оптичної системи.

Оскільки залежність (4) лінійна, то зрозуміло, що максимум зсуву частоти  $\Delta\mathbf{v}_{\max}$  відповідає максимальному нахилу просторового елемента ОІ над дефектом, а отже, максимальним змінам у структурі відповідного ЛСЗ.

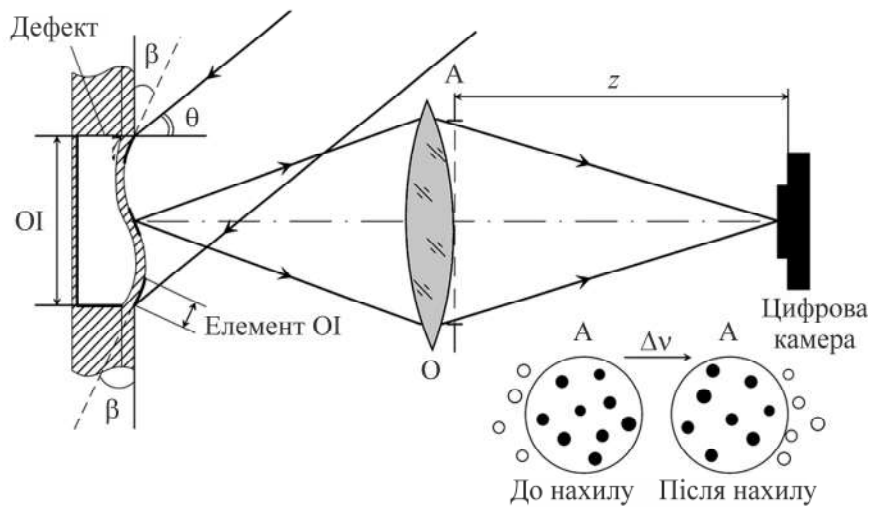


Рис. 1. Оптична схема формування спекл-зображень, які генерує шорстка поверхня композиту, частину якої займає ОІ:  $\theta$  – кут падіння лазерного променя;  $z$  – відстань між апертурою об’єктива та матричним фотодетектором;  $\beta$  – кут нахилу елемента ОІ до незбудженої площини композиту;  $\Delta v$  – зсув спектра від ОІ в апертурі А об’єктива О.

Розглянемо тонкий шар композиту над дефектом, тобто ОІ, як тонку мембрану зі затиснутими краями [11]. Якщо підповерхневий дефект прямокутний, а його ОІ є шорсткою поверхнею такого ж розміру, як і дефект, то ОІ можна описати функцією форми тонкої прямокутної мембрани такого ж розміру. У спрощеному лінійному наближенні без урахування нелінійних поперечних навантажень, що прикладені до композитної пластини, рівняння синусоїдальних коливань тонкої прямокутної мембрани від площини згідно з працею [17] подамо так:

$$U_{k,n}(x, y, t) = A_{k,n} \sin(2\pi f_{k,n}t + \varphi_{k,n}) \sin(\lambda_k x) \sin(\mu_n y) = u_{k,n}(t) u_{k,n}(x, y), \quad (5)$$

де  $k$  і  $n$  – моди власних частот  $f_{k,n}$  коливань мембрани;  $\varphi_{k,n}$  – фазовий зсув під час коливань;  $\lambda_k = k\pi/l$ ,  $\mu_n = n\pi/m$ ;  $l$  і  $m$  – сторони прямокутної мембрани;  $A_{k,n}$  – амплітуда її коливань.

Упродовж одного періоду коливань мембрани максимальні кути нахилу  $\beta_{\max}$  та  $-\beta_{\max}$  у двох протилежних напрямках досягаються двічі. За цих кутів отримують максимальні зсуви просторових частот  $\Delta v_{\max}$  і  $-\Delta v_{\max}$ , які породжують найбільші просторові трансформації структури ЛСЗ. Цілком очевидно, що ділянки ЛСЗ, які зазнають максимальних трансформацій, відповідають просторовим елементам ОІ з максимальними кутами нахилу, а отже, з максимальними градієнтами в межах ОІ. Щоб знайти розташування цих максимальних градієнтів, можна використати рівняння (5) для оцінки просторового розподілу модуля вектора градієнта  $\|\nabla u_{k,n}(x, y)\|$  функції  $u_{k,n}(x, y)$ , як це зроблено для прямокутної мембрани, затиснутої по краях [14]. З цієї метою рівняння (5) для моди (1,3) прямокутної мембрани (1,3) подамо так:

$$U_{13}(x, y, t) = u_{13}(t) u_{13}(x, y) = A_{13} \sin(2\pi f_{13}t + \varphi_{13}) \sin \frac{\pi x}{l} \sin \frac{3\pi y}{m}, \quad (6)$$

де  $u_{13}(t) = A_{13} \sin(2\pi f_{13}t + \varphi_{13})$ .

Диференціюючи рівняння (6) за  $x$  і  $y$  і припускаючи, що  $\varphi_{13} = 0$ , отримаємо:

$$\begin{aligned} [U_{13}(x, y, t)]_{grad} &= u_{13}(t) \|\nabla u_{13}(x, y)\| = \\ &= A_{13} \sin(2\pi f_{13}t) \sqrt{\frac{\pi^2}{l^2} \cos^2\left(\frac{\pi x}{l}\right) \sin^2\left(\frac{3\pi y}{m}\right) + \frac{9\pi^2}{m^2} \sin^2\left(\frac{\pi x}{l}\right) \cos^2\left(\frac{3\pi y}{m}\right)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Якщо  $l = m = 1$  (дефект квадратний),  $f_{13} = 1/(T_{US})_{13}$ , де  $(T_{US})_{13}$  – період УЗ коливань, а максимальні нахили у протилежних напрямках коливань мембрани досягаються за екстремальних значень гармонічної УЗ хвилі, тобто коли  $t_1 = T_{US} [1/4 + (p-1)]$  і  $t_2 = T_{US} [3/4 + (p-1)]$ , де  $p = 1, \dots, P$ , рівняння (7) набуває вигляду

$$[U_{13}(x, y, t)]_{grad|t=t_1, t_2} = (\pm A_{13}) \sqrt{\pi^2 \cos^2(\pi x) \sin^2(3\pi y) + 9\pi^2 \sin^2(\pi x) \cos^2(3\pi y)}. \quad (8)$$

Просторовий розподіл повного поля видуг і вузлів квадратної мембрани для моди (1,3), розрахований за рівнянням (8), зображено на рис. 2. Тут вузли позначені світлими плямами, а видуги – темними. Отже, у цьому випадку ОІ, тобто ділянка тонкого шару поверхні, що охоплює весь квадратний підповерхневий дефект, закріплена по краях тонкою мембраною, яка вібрує на моді (1,3).

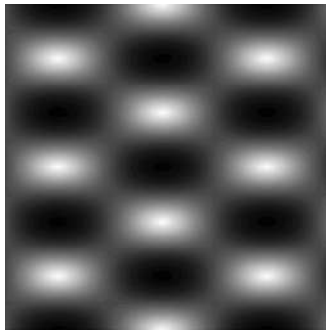


Рис. 2. Просторовий розподіл градієнта моди (1,3) для квадратної мембрани зі затиснутим краєм.

Просторові елементи ОІ, розташовані у вузлах мембрани, які нахилиються на кут  $\beta$ , призводять до зсуву частоти  $\Delta v$  у спектрі кожного вузла і трансформації структури ЛСЗ, яку формує ОІ. В результаті виникає декореляція між початковим ЛСЗ, сформованим до УЗ збудження, та трансформованим, зареєстрованим під час збудження. Взаємозв'язок між декореляцією від нахилу просторового елемента ОІ і зсувом просторової частоти можна знайти за коефіцієнтом кореляції Ямагучі (ККЯ) для круглої апертури об'єктива [18, 19]:

$$C_Y = \frac{4}{\pi^2} \left[ \arccos\left(\frac{|\Delta v|}{D_v}\right) - \frac{|\Delta v|}{D_v} \sqrt{1 - \left(\frac{|\Delta v|}{D_v}\right)^2} \right]^2. \quad (9)$$

Тут

$$D_v = D / \lambda z \quad (10)$$

діаметр апертури об'єктива в області просторових частот;  $D$  – геометричний діаметр апертури;  $z$  – відстань між апертурою об'єктива та матричним фотодетектором.

Зауважимо також, що на зміну структури спеклів у межах ЛСЗ додатково впливає рух ОІ у напрямі від площини композиту, який змінює структуру спеклів у межах ЛСЗ і контраст окремих її елементів. Такі переміщення шорсткої поверх-

ні описані раніше [19, 20]. Згідно з отриманими теоретичними та експериментальними результатами, якщо шорстка поверхня вібрує, то оптичні хвилі, що розсіюються на ній, набувають додаткових випадкових різниць фаз, які вносять фазові спотворення від рухомої поверхні [20]. Тому просторова когерентність зображення ОІ, тобто ЛСЗ, зменшується і ЛСЗ втрачає контраст.

Якщо  $\Delta v = D_v$ , то ККЯ рівний нулю, і формулу для обчислення порогового кута нахилу  $\beta_t$  в оптичній системі формування спекл-зображення, за якого  $C_Y = 0$ , легко отримати, використовуючи вирази (4), (9) і (10), тобто

$$\beta_t = \frac{M_l D}{z(1 + \cos \theta)}. \quad (11)$$

Якщо  $\theta$ ,  $M_l$  і  $z$  мають задані значення, то кут  $\beta_t$  лінійно залежить від діаметра апертури  $D$  і зменшується зі збільшенням діафрагмового числа  $f_{\#} = F_o / D$ , де  $F_o$  – фокусна віддаль об'єктива.

Макет ГОЦС для виявлення і локалізації підповерхневих дефектів у шаруватих композитних структурах зі застосуванням гармонічного УЗ збудження зразка створено для реалізації оптико-акустичного методу. Принцип його дії описано у працях [9–11]. Зауважимо лише, що в оптичній схемі макета пороговий кут нахилу  $\beta_t$  досягається між елементами ОІ, коли вони перебувають у антифазі між собою під час збудження, тобто у протилежних положеннях у межах одного коливання. Тому для досягнення відхилень елемента ОІ, за яких починається повна декореляція, пороговий кут його нахилу  $\beta = \beta_{thr}$  до площини композиту (див. рис. 1) повинен бути вдвічі менший за кут  $\beta_t$ , тобто

$$\beta_{thr} = \beta_t / 2. \quad (12)$$

Підставивши вираз (12) у (11), отримуємо робочу формулу для визначення порогового кута нахилу  $\beta_{thr}$  елемента ОІ:

$$\beta_{thr} = \frac{M_l D}{2z(1 + \cos \theta)} = \frac{M_l F_o}{2zf_{\#}(1 + \cos \theta)}. \quad (13)$$

За результатом обчислення кута  $\beta_{thr}$  для різних діафрагмових чисел  $f_{\#}$  об'єктивів “VEGA-7 (2/20)” та “Carl Zeiss Flektogon 20 mm F2.8” встановили його незначне зростання зі збільшенням кута падіння  $\theta$  лазерного пучка, причому, що менше діафрагмове число  $f_{\#}$ , то менший кут  $\beta_{thr}$  [11]. Такі результати важливі для вибору оптимальних габаритних параметрів оптичної схеми ГОЦС.

**Алгоритми оброблення послідовностей спекл-зображень.** Для побудови мап дефектів розробили декілька алгоритмів оброблення спекл-зображень, які включені до програмного забезпечення макета ГОЦС. Найпростіший алгоритм формування  $q$ -го різницевого спекл-зображення ( $q = 1, 2, \dots, Q$ ) полягав у сумуванні послідовності початкових  $P$  непарних  $I_{p,q1}(k,l)$  та парних  $I_{p,q2}(k,l)$  ( $p = 1, 2, \dots, P$ ) спекл-зображень, зареєстрованих цифровою камерою з однаковими експозиціями  $\tau$  за додатних та від'ємних півперіодів  $T_{US}/2$   $q$ -го періоду  $T_{US}$  УЗ коливань випромінювання збудження. За накопиченими початковими спекл-зображеннями у цифровій камері для кожного  $q$ -го періоду  $T_{US}$  отримували сумарне непарне  $I_{q,o}(k,l) = \sum_p I_{p,q1}(k,l)$  та сумарне парне  $I_{q,e}(k,l) = \sum_p I_{p,q2}(k,l)$ .

Далі реалізували найпростіший алгоритм формування  $q$ -го різницевого спекл-зображення (РСЗ):

$$I_q(k, l) = |I_{q,o}(k, l) - I_{q,e}(k, l)|. \quad (14)$$

Так досягали декореляції спеклів і розмиття ЛСЗ, що генерується ОІ внаслідок її протилежних нормальних рухів під час реєстрації парних і непарних спекл-зображень. Отримане РСЗ можна розглядати як мапу дефектів, що містить просторовий відгук від підповерхневого дефекту, а також навколишній фон, який оточує цей відгук і формується ділянкою поверхні композитної панелі, розміщеною за межами ОІ.

Щоб отримати інтенсивніший просторовий відгук у межах ЛСЗ, пропонуємо зареєструвати  $Q$  разів сумарні спекл-зображення  $I_{q,o}(k, l)$  і  $I_{q,e}(k, l)$  і просумувати отримані РСЗ  $I_1(k, l), \dots, I_q(k, l), \dots, I_Q(k, l)$ . Алгоритм сумування РСЗ, або алгоритм усереднених різниць (УСР) можна описати так [9–11]:

$$I_\Sigma(k, l) = (\gamma Q)^{-1} \sum_q |I_{q,o}(k, l) - I_{q,e}(k, l)| = (\gamma Q)^{-1} \sum_q I_q(k, l), \quad (15)$$

де  $\gamma$  ( $Q^{-1} \leq \gamma \leq 1$ ) – ваговий коефіцієнт для вибору оптимальної інтенсивності результуючої мапи дефектів. Додатково розробили два алгоритми низькочастотної фільтрації (НЧФ) для РСЗ та УСР.

**Особливості вибору фундаментальної резонансної частоти дефекту.** Знаючи фундаментальну резонансну частоту для підповерхневого дефекту, можна вибирати оптимальні УЗ частоти збудження матеріалу під час його технічної діагностики.

Такі дефекти різної форми проаналізовано в праці [4], де отримали формулу для фундаментальної резонансної частоти:

$$f_0^t = \frac{\pi}{4\sqrt{3}} \frac{h}{L^2} R^2 \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\mu^2)}} = \frac{0,45h}{L^2} R^2 \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}. \quad (16)$$

Тут  $h$  – глибина залягання дефекту, тобто товщина пластини над дефектом (товщина ОІ);  $L$  – параметр розмірів дефекту;  $R$  – коефіцієнт його форми;  $E$  – модуль згину для матеріалу пластини над дефектом;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона матеріалу;  $\rho$  – його густина.

Для квадратного планарного дефекту зі стороною  $a$  формула (16) набуває вигляду [4]

$$f_{11}^t = \frac{\pi}{3} \frac{h}{a^2} \sqrt{\frac{8}{3}} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}. \quad (17)$$

Як бачимо, фундаментальна резонансна частота прямо пропорційна до глибини залягання дефекту і обернено пропорційна до його площі. Якщо припустити, що ОІ є тонкою квадратною мембраною, то можна легко обчислити резонансну частоту моди  $(m, n)$  відносно фундаментальної для такої мембрани за відомою формулою [21]:

$$f_{mn}^t = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{a}\right)^2} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{m^2 + n^2}{a^2}}. \quad (18)$$

Тут  $(m, n)$  – ідентифікатор форми моди, або кількість вигук уздовж осей  $x$  і  $y$ , відповідно;  $c = \sqrt{T/\rho_s}$  – швидкість поширення УЗ хвилі в мембрані;  $T$  – натяг мембрани на одиницю довжини її краю;  $\rho_s$  – її густина за площею.

За формулою (18) знайдемо деякі співвідношення між фундаментальною і кратними резонансними частотами для квадратної мембрани. Маємо:

$$f_{12}^T/f_{11}^T = 1,581, \quad f_{13}^T/f_{11}^T = 2,236, \quad f_{14}^T/f_{11}^T = 2,915, \quad f_{15}^T/f_{11}^T = 3,606. \quad (19)$$

Отже, якщо відома фундаментальна резонансна частота мембрани, то за співвідношеннями (19) легко знайти її кратні резонансні частоти. Однак для цього спочатку слід обчислити фундаментальну на моді (1,1).

Нехай тонким шаром над прямокутним дефектом є ізотропний склотекстоліт СТЕФ-1. Згідно з відомими літературними даними, його модуль Юнга, який рівний модулю згину, становить  $E = 26$  ГПа, коефіцієнт Пуассона  $\mu = 0,35$ , густина матеріалу  $\rho = 1800$  кг/м<sup>3</sup>. Нехай також  $h = 0,41$  мм і  $a \times a = 20 \times 20$  мм<sup>2</sup>. Підставивши ці значення у формулу (17), отримаємо  $f_{11}^t = 7,11$  кГц. Формули (16) і (17) мають обмежене застосування. Наприклад, товщина ОІ мусить бути не менш ніж у 20 разів менша за розмір дефекту [22].

**Експериментальні результати.** Планарні підповерхневі дефекти досліджували з допомогою макета ГОЦС. Для цього виготовляли тестові панельні зразки шаруватого композиту зі склотекстоліту СТЕФ-1. Зразки розмірами  $400 \times 250$  мм<sup>2</sup> складалися з трьох склеєних ізотропних шарів СТЕФ-1. У середньому шарі, який у кожному зразку мав товщину 1,5 мм, вирізали круглі та квадратні отвори, щоб сформувати планарні тестові підповерхневі дефекти (рис. 3). Верхні панелі товщинами 0,5 мм; 1; 1,5; 2; 2,5 і 3 мм клеїли до середніх з отворами, отримуючи панелі із планарними підповерхневими дефектами, розташованими на відповідних глибинах  $h$ . Насправді, глибини залягання планарних дефектів дещо відрізнялись від номінальних через нерівномірний розподіл товщини по площі верхньої панелі та шару клею. Зокрема, для дефекту 4 (квадратний отвір,  $20 \times 20$  мм<sup>2</sup>) глибини залягання становили: на панелі 1 – 0,41 мм (номінальна глибина залягання 0,5 мм); на панелі 2 – 1,17 мм (номінальна глибина 1 мм); на панелі 3 – 1,49 мм (номінальна глибина 1,5 мм); на панелі 4 – 1,87 мм (номінальна глибина 2 мм); на панелі 5 – 2,13 мм (номінальна глибина 2,5 мм); на панелі 6 – 2,86 мм (номінальна глибина 3 мм).

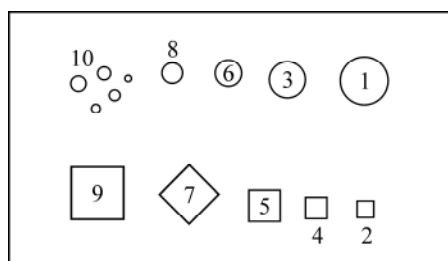


Рис. 3. Схема розташування отворів у середніх шарах тестових панелей:

- 1 – круглий,  $\varnothing 45$  мм; 2 – квадратний,  $15 \times 15$  мм<sup>2</sup>; 3 – круглий,  $\varnothing 35$  мм;
- 4 – квадратний,  $20 \times 20$  мм<sup>2</sup>; 5 – квадратний,  $30 \times 30$  мм<sup>2</sup>; 6 – круглий,  $\varnothing 25$  мм;
- 7 – квадратний,  $35 \times 35$  мм<sup>2</sup>; 8 – круглий,  $\varnothing 20$  мм; 9 – квадратний,  $50 \times 50$  мм<sup>2</sup>;
- 10 – круглі,  $\varnothing 6$ ,  $\varnothing 8$ ,  $\varnothing 10$ ,  $\varnothing 12$  і  $\varnothing 14$  мм.

Досліджували панелі 1–4, щоб виявити просторові відгуки від дефекту 4 (рис. 3) на різних глибинах залягання. Під час зондування кожної панелі виявляли просторовий відгук від дефекту, тобто ЛСЗ, яку формує ОІ, розташована над ним. За формою просторового відгуку визначали фундаментальну резонансну частоту  $f_{11}$ , а також кратні резонансні  $f_{12}, f_{13}, f_{14}, f_{15}$ . Як відомо, у тонкому шарі композиту над дефектом поширюються згинальні хвилі [3, 4], які діють на ОІ над



дефектом 4 у поперечних до поширення хвилі напрямках. Якщо розглядати ОІ як тонку квадратну мембрану, в якій під час резонансу формуються вузли і вигуди, що змінюються синхронно із частотою УЗ збудження, то згідно зі запропонованим вище підходом у вузлах спекл-зображення мембрани виникає оптичний просторовий відгук у вигляді світлих плям лише у поперечних до поширення УЗ хвилі напрямках. За просторовою структурою цих плям можна визначити кратність резонансної частоти. Наприклад, дві плями для фундаментальної резонансної частоти у вузлах квадратної мембрани зображені на рис. 4а, а на рис. 4б і 4в наведені відгуки від дефекту 4, розташованого в панелі 1, які відповідають фундаментальній частоті  $f_{11} = 12,2$  кГц. Відгук на рис. 4б одержали в реальному часі за алгоритмом формування РСЗ, а на рис. 4в – після оброблення зображеного на рис. 4б відгуку алгоритмом НЧФ РСЗ.

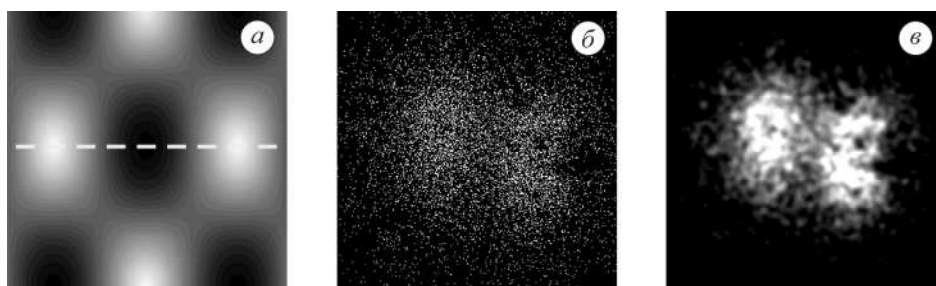


Рис. 4. Просторовий відгук від дефекту 4, розташованого в панелі 1, на фундаментальній резонансній частоті  $f_{11}$ : вузли квадратної мембрани зображені у вигляді світлих плям на фундаментальній резонансній частоті  $f_{11}$ ; а (штрихова лінія) – напрям дії згинальних хвиль на мембрану; б – реальний відгук від дефекту на фундаментальній резонансній частоті  $f_{11} = 12,2$  кГц; в – результат оброблення реального відгуку алгоритмом НЧФ РСЗ.

Зі зростанням сканувальної УЗ частоти збудження цей відгук зникає і з'являється новий вже на кратній резонансній частоті  $f_{12} = 15,8$  кГц. На рис. 5а зображено відгук від квадратної мембрани на частоті  $f_{12}$ , на рис. 5б – реальний відгук від дефекту 4, а на рис. 5в – результат його оброблення за допомогою алгоритму НЧФ РСЗ. Подібні результати отримали для кратної резонансної частоти  $f_{13} = 24,2$  кГц. На рис. 6а зображено відгук від квадратної мембрани на частоті  $f_{13}$ , на рис. 6б – реальний відгук від дефекту 4, а на рис. 6в – результат його оброблення за допомогою алгоритму НЧФ РСЗ.

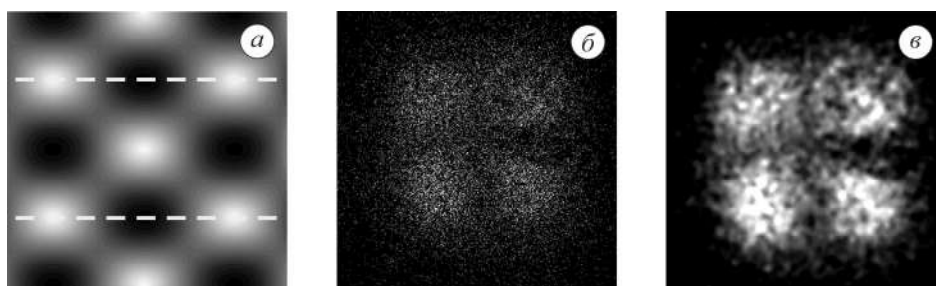


Рис. 5. Просторовий відгук від дефекту 4, розташованого в панелі 1, на кратній резонансній частоті  $f_{12}$ : вузли квадратної мембрани зображені у вигляді світлих плям на кратній резонансній частоті  $f_{12}$ ; а (штрихові лінії) – напрям дії згинальних хвиль на мембрану; б – реальний відгук від дефекту 4 на кратній резонансній частоті  $f_{12} = 15,8$  кГц; в – результат оброблення реального відгуку алгоритмом НЧФ РСЗ.

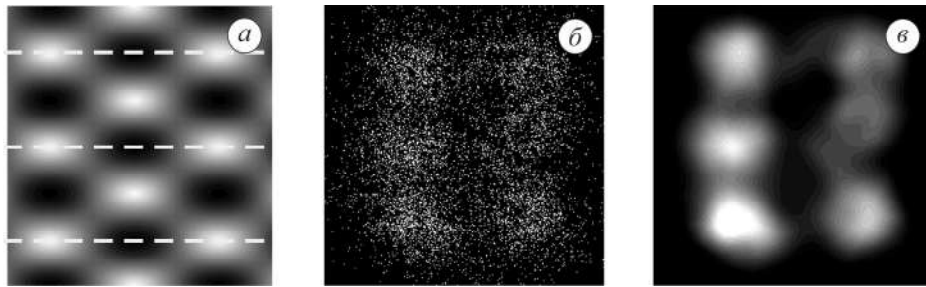


Рис. 6. Просторовий відгук від дефекту 4, розташованого в панелі 1, на кратній резонансній частоті  $f_{13}$ : вузли квадратної мембрани зображені у вигляді світлих плям на кратній резонансній частоті  $f_{13}$ ; *a* (штрихові лінії) – напрям дії згинальних хвиль на мембрану; *б* – реальний відгук від дефекту 4 на кратній резонансній частоті  $f_{13} = 24,2$  кГц; *в* – результат обробки реального відгуку алгоритмом НЧФ РСЗ.

Досліджували також решту панелей, вказаних вище, і отримали графічні залежності резонансних частот  $f_{11}, f_{12}, f_{13}$  від глибини залягання  $h$  дефекту 4 (рис. 7). Виявили, що зі збільшенням глибини  $h$  монотонно зростає фундаментальна резонансна частота  $f_{11}$ , а також кожна кратна резонансна  $f_{12}$  і  $f_{13}$ . На рис. 7 наведені також залежності резонансних частот  $f_{11}^t, f_{12}^t, f_{13}^t$  від параметра  $h$ , обчислені за формулами (17)–(19). Крім того, спостерігали формування просторових відгуків на кратних резонансних частотах  $f_{14}$  і  $f_{15}$ . Порівняння цих графічних залежностей вказує на відхилення експериментальних результатів від теоретичних, що особливо помітно як на малих глибинах залягання дефекту ( $h < 0,8$  мм), так і на великих ( $h > 1,5$  мм).

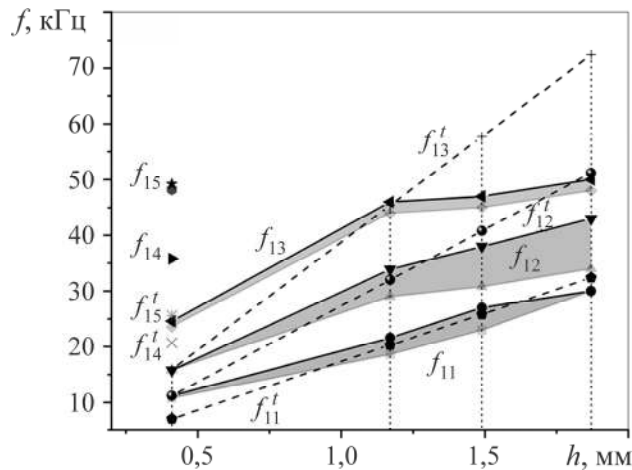


Рис. 7. Залежності резонансних частот  $f_{11}; f_{12}; f_{13}$ , одержаних експериментально для дефекту 4, а також відповідних  $f_{11}^t; f_{12}^t; f_{13}^t$  (штрихові лінії), обчислених за формулами (17)–(19), від глибини залягання  $h$  планарного дефекту 4:  
 ● – ▲ – частоти  $f_{11}$ ; ▼ – ▲ –  $f_{12}$ ; ◀ – ◆ –  $f_{13}$ ; ▶ –  $f_{14}$ ; ★ – ● –  $f_{15}$ .

**Обговорення результатів.** Виявлені невідповідності між експериментальними і теоретичними результатами можна пояснити так. По-перше, достовірність формули (17) слід перевірити, виконавши більшу кількість експериментів з різними типами дефектів правильної форми на різних глибинах залягання та з різними композитними структурами. По-друге, розмір дефекту повинен не менш

ніж у 20 разів перевершувати товщину шару, що покриває дефект, тобто товщину ОІ [17]. Під час досліджень така умова задовільнялася лише для найменшої глибини залягання  $h = 0,41$  мм дефекту 4, розташованого в панелі 1. По-третє, неточності у виготовленні цього дефекту, обмежені розміри панелі, що призводить до реверберації УЗ хвиль, та відхилення напряду генерування УЗ хвиль сприяють загасанню резонансних частот і появи вироджених мод, які порушують співвідношення між резонансними частотами і формують хибні просторові відгуки. По-четверте, на поперечні вібрації ОІ впливають також деформація зсуву та кругова інерція обертання [4].

Водночас отримані результати засвідчили доцільність і ефективність використання оптико-акустичного методу і нового підходу до виявлення підповерхневих дефектів на основі концепції формування модової структури коливань ОІ на фундаментальній та кратних резонансних частотах тонкої закріпленої мембрани під дією згинальних УЗ-хвиль.

1. Lobanov, L.M.; Muravsky, L.I.; Pivtorak, V.A.; Voronyak, T.I. Technical diagnostics of materials and structures: Reference manual; Lobanov, L.M. Ed.: Vol. 3: Monitoring of structural elements stress state with the use of electromagnetic waves in the optical range; Nazarchuk, Z.T. Ed.: Prostir-M, 2017. [in Ukrainian]
2. Sfarra, S.; Avdelidis, N.P.; Ibarra Castanedo, C. et al. Surface and subsurface defects detection in impacted composite materials made by natural fibers, using nondestructive testing methods. *Int. J. Compos. Mater.*, **2014**, 4(5A), 1–9. DOI: 10.5923/j.comaterials.201401.01
3. Solodov, I.; Bai, J.; Bekgulyan, S.; Busse, G. A local defect resonance to enhance acoustic wave-defect interaction in ultrasonic nondestructive evaluation. *Appl. Phys. Lett.*, **2011**, 99(21), 211911. <https://doi.org/10.1063/1.3663872>
4. Solodov, I.; Rahammer, M.; Kreutzbruck, M. Analytical evaluation of resonance frequencies for planar defects: Effect of a defect shape. *NDTE Int.*, **2019**, 102, 274–280.
5. 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>
6. Fomitchov, P.A.; Krishnaswamy, S. A compact dual-purpose camera for shearography and electronic speckle-pattern interferometry. *Meas. Sci. Technol.*, **1997**, 8, 581. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/8/5/019>
7. Pouet, B.; Chatters, T.; Krishnaswamy, S. Synchronized reference updating technique for electronic speckle interferometry. *J. Nondestruct. Eval.*, **1993**, 12, 133–138. <https://doi.org/10.1007/BF00567569>
8. Thomas, B.P.; Pillai, S.A.; Narayanamurthy, C.S. Investigation on vibration excitation of debonded sandwich structures using time-average digital holography. *Appl. Opt.*, **2017**, 56, F7–F13. <https://doi.org/10.1364/AO.56.0000F7>
9. Muravsky, L.; Kuts, O.; Gaskevych, G.; Suriadova, O. Detection of subsurface defects in composite panels using dynamic speckle patterns. 2019 XI<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conf. on Electronics and Information Technologies (ELIT). IEEE Proc., 2019, pp. 7–10. <https://doi.org/10.1109/ELIT.2019.8892294>
10. Nazarchuk, Z.; Muravsky, L.; Kuryliak, D. To the problem of the subsurface defects detection: theory and experiment. *Procedia Struct. Integr.*, **2019**, 16, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.016>
11. Nazarchuk, Z.T.; Muravsky, L.I.; Kuts, O.G. Nondestructive testing of thin composite structures for subsurface defects detection using dynamic laser speckles. *Res. Nondestruct. Eval.*, **2022**, 33, 59–77. <https://doi.org/10.1080/09349847.2022.2049407>
12. Spagnolo, G.S.; Paoletty, D.; Zanetta, P. Local speckle correlation for vibration analysis. *Opt. Commun.*, **1996**, 123, 41–48. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(95\)00507-2](https://doi.org/10.1016/0030-4018(95)00507-2)
13. Wong, W.O. Vibration analysis by laser speckle correlation. *Opt. Lasers Eng.*, **1997**, 28, 277–286. [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(97\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(97)00029-8)
14. Keene, L.; Chiang, F.P. Real-time anti-node visualization of vibrating distributed systems in noisy environments using defocused laser speckle contrast analysis. *J. Sound Vib.*, **2009**, 320, 472–481. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.08.022>

15. Bruno, L.; Pagnotta, L.; Poggialini, A. Laser speckle decorrelation in NDT. *Opt. Lasers Eng.*, **2000**, 34, 55–65. [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(00\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(00)00057-9)
16. Aramanovich, I.G.; Levin, V.I. Equations of mathematical physics, 2<sup>nd</sup> edn. *Nauka*, 1969. [in Russian]
17. Fricke-Begemann, T. Three-dimensional deformation field measurement with digital speckle correlation. *Appl. Opt.*, **2003**, 42(34), 6783–6796. <https://doi.org/10.1364/AO.42.006783>
18. Yamaguchi, I. Speckle displacement and decorrelation in the diffraction and image fields for small object deformation. *Opt. Acta: Int. J. Opt.*, **1981**, 28, 1359–1376. <https://doi.org/10.1080/713820454>
19. Owner-Petersen, M. Decorrelation and fringe visibility: on the limiting behavior of various electronic speckle-pattern correlation interferometers. *J. Opt. Soc. Am. A.*, **1991**, 8, 1082–1089. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.8.001082>
20. Eliasson, B.; Mottier, F.M. Determination of the granular radiance distribution of a diffuser and its use for vibration analysis. *J. Opt. Soc. Am.*, **1971**, 61, 559–565. <https://doi.org/10.1364/JOSA.61.000559>
21. Abbasi, N.M. Vibration of a rectangular membrane. Demonstrations Project. <http://demonstrations.wolfram.com/VibrationOfARectangularMembrane/Wolfram> (accessed 2022-10-21).
22. Wong, B.S. Non-destructive evaluation (NDE) of composites: detecting delamination defects using mechanical impedance, ultrasonic and infrared thermographic techniques, In: Non-destructive evaluation (NDE) of polymer matrix composites. Karbhari, V.M. Ed.: *Woodhead Publishing*, 2013, pp. 279–305. <https://doi.org/10.1533/9780857093554.2.279>

Одержано 22.08.2022