

ВИЯВЛЕННЯ КРУГЛИХ ПІДПОВЕРХНЕВИХ ДЕФЕКТІВ У ШАРУВАТИХ КОМПОЗИТАХ ЗА ДОПОМОГОЮ ОПТИКО-АКУСТИЧНОЇ СИСТЕМИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

О.М. Шарабура, Л.І. Муравський, О.Г. Куць

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова 5. E-mail: muravskyleon@gmail.com

Створено макет оптико-акустичної системи неруйнівного контролю підповерхневих дефектів у шаруватих композитних структурах. Виявлення та локалізація підповерхневих дефектів у шаруватих композитних структурах за допомогою макета оптико-акустичної системи виконується шляхом формування серій динамічних спекл-зображень поверхні композиту, збудженого згинальною пружною хвилею, подальшої їх реєстрації і накопичення з метою генерування різницевого цифрового спекл-зображення та виділення оптичних просторових відгуків від дефектів. Для оцінювання ефективності виявлення таких дефектів виготовляли склопластикові шаруваті структури, які містили три шари склотекстолітових пластин і круглі плоскі дефекти різних розмірів у середньому шарі. На основі проведених досліджень отримано експериментальну залежність основної резонансної частоти круглих підповерхневих дефектів від їх розмірів, яка близька до побудованої теоретичної. Показано, що за допомогою створеного макета оптико-акустичної системи можна виявляти такі дефекти у широкому діапазоні зміни їх розмірів. Бібліогр. 24, рис. 5.

Ключові слова: оптико-акустична система, динамічне спекл-зображення, круглий підповерхневий дефект, область інтересу, різницеве цифрове спекл-зображення, пружна хвиля, шаруватий композит

Вступ. Постійне вдосконалення матеріалів і елементів конструкцій, які використовують у машинобудуванні, авіакосмічній галузі, будівельній індустрії тощо, вимагає неперервного розвитку методів і засобів їх неруйнівного контролю (НК) і технічної діагностики. Для розробки нових та удосконалення наявних засобів НК матеріалів і конструкцій використовують процеси, що мають у своїй основі різноманітну фізичну природу. Багато залежить від умов, за яких передбачається проведення процесу контролю, властивостей матеріалів, з яких виготовлено об'єкт дослідження, які типи дефектів необхідно виявити тощо. В останні роки інтенсивного розвитку набули засоби швидкісного НК, які побудовані на принципах термографії, цифрової спекл-інтерферометрії та ширографії [1–4], і дають можливість паралельного відбору дво- і тривимірних масивів даних з великої площі об'єкта досліджень і подальшої їх цифрової обробки.

Перевагою термографічних методів є велика площа об'єкта та безконтактність процедури нагрівання матеріалу. Проте мала товщина матеріалу об'єкту дослідження, значні енергетичні витрати на його нагрівання та висока вартість обладнання, зокрема інфрачервоної камери, обмежують їх можливості. До того ж, потреба в попередньому нагріванні об'єкта дослідження наносить шкоду оточуючому середовищу та погіршує екологічний стан навколишньої місцевості.

Для НК поверхонь значної площі ефективно використовують методи ширографії [3–6]. Широ-

графічні системи дають можливість опрацьовувати велику площу об'єкта дослідження з високою швидкістю без потреби в додатковому нагріванні. Їх використовують для виявлення, вимірювання та локалізації аномалій шляхом відтворення та візуалізації мікроскопічних змін на досліджуваній поверхні під час відповідного навантаження. Цифрова камера ширографа перевіряє все поле зору практично одночасно на відміну від сканувальних віброметричних та ультразвукових (УЗ) засобів НК [3]. Існує низка способів прикладання навантаження у таких системах, зокрема різноманітні механічні та вібраційні навантаження, навантаження під дією звукових чи УЗ сигналів, тиску тощо, які призводять до незначних локальних деформацій поверхні, зумовлених наявністю як поверхневих, так і підповерхневих дефектів. Це можуть бути пошкодження від удару, роз'єднання, відшарування, пористість, термічні пошкодження, тріщини тощо. Такі деформації легко розпізнати за допомогою ширографічних систем НК [1, 2, 5, 6]. Проте у таких системах необхідно використовувати ширографічний інтерферометр, що ускладнює та робить громіздкою їх загальну конструкцію.

На відміну від інтерферометричних методів НК, в оптико-акустичному методі (ОАМ) для виявлення підповерхневих дефектів у композитних структурах використовують лише спекл-зображення поверхні, яку збуджують пружними хвилями від джерел акустичного випромінювання. Формування когерентних спекл-зображень відбувається без використання

О.М. Шарабура – <https://orcid.org/0000-0002-5712-4114>, Л. І. Муравський – <https://orcid.org/0000-0001-8839-2819>

© О.М. Шарабура, Л.І. Муравський, О.Г. Куць, 2024

опорного лазерного променя, завдяки чому значно спрощуються оптико-цифрові системи НК, що реалізують ОАМ. Метод полягає у збудженні композитної структури згинальною пружною хвилею, освітленні ділянки поверхні композиту розширеним лазерним променем, формуванні серій динамічних спекл-зображень ділянки поверхні композиту з частотою, яка відповідає частоті пружної хвилі, що монотонно зростає або спадає, реєстрації цифрових спекл-зображень (ЦСЗ) як результату накопичення серій динамічних спекл-зображень, отриманих за протилежних полярностей пружної хвилі, а також у формуванні оптичних просторових відгуків від областей інтересу, розташованих безпосередньо над дефектами, шляхом швидкісної обробки ЦСЗ. Далі за побудованими мапами дефектів визначають розташування, розміри та глибини залягання підповерхневих дефектів. ОАМ детально описаний у [7–11].

Оптико-акустична система неруйнівного контролю підповерхневих дефектів. Для технічної реалізації ОАМ створено макет оптико-акустичної системи (ОАС) НК підповерхневих дефектів [7–11], блок-схему якого зображено на рис. 1. Одна з ключових відмінностей ОАС полягає в тому, що вона порівняно з відомими інтерферометричними системами виявлення внутрішніх дефектів не містить інтерферометра або широкографічного вузла, завдяки чому має набагато простішу конструкцію та малочутлива до вібрацій та інших зовнішніх впливів.

Оптичний просторовий відгук від підповерхневого дефекту в ОАС отримують шляхом порів-

няння зареєстрованих ЦСЗ $I_{n1}(i, j)$, отриманих за максимальних значень амплітуди пружної хвилі, з ЦСЗ $I_{n2}(i, j)$, отриманих за її мінімальних значень. Процедура взаємної кореляції ЦСЗ детально описана в [9–11] і виконується шляхом одержання різницевого ЦСЗ:

$$I_n(i, j) = |I_{n1}(i, j) - I_{n2}(i, j)| \quad (1)$$

Після отримання різницевого ЦСЗ, яке можна трактувати як мапу дефектів, виникає закономірне питання, яким чином на основі отриманої мапи визначити параметри дефекту. Для цього слід встановити зв'язок між формою підповерхневого дефекту та розміром і глибиною його залягання. Один із можливих підходів до розв'язання такої проблеми полягає у застосуванні методів математичної фізики для побудови математичної моделі відповідного дефекту. Щоб отримати вирази, які поєднують фізичні параметри матеріалу, з якого виготовлено об'єкт діагностики, з параметрами дефекту та його резонансними частотами, використовують підходи, розвинуті в теорії пластин та оболонок [12, 13]. У працях, проаналізованих і узагальнених у [13], наведено результати досліджень для плоских ізотропних і анізотропних пластин різної форми, зокрема для прямокутних [14, 15], круглих і еліптичних [16–19], у тому числі з різними граничними умовами. Теорія коливань пластин та оболонок [12, 13] у різних варіантах запису широко застосовується в галузі неруйнівного контролю та технічної діагностики [20–24]. У [9–11], зокрема, використано формули для моделі квадратного підповерхневого дефекту. Згідно з цією моделлю, область інтересу над плоским дефектом можна розглядати як тонку квадратну мембрану, затиснуту по краях. Якщо такий дефект збуджують на одній з його резонансних частот, тобто на одній з резонансних частот області інтересу над дефектом, то на виході ОАС формуватиметься оптичний просторовий відгук від дефекту. Для круглого плоского підповерхневого дефекту також можна використати модель затиснутої по краях круглої пластини з ізотропного матеріалу, яку можна розглядати як область інтересу над підповерхневим дефектом, розміри якої відповідають розмірам дефекту. Згідно з [13, 20], формула для визначення основної частоти f_{01} резонансного коливання такої пластини має вигляд:

$$f_{01} = 0,47 \frac{h}{a^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}, \quad (2)$$

де a – радіус мембрани, мм; h – глибина залягання дефекту, мм; E – модуль Юнга, ГПа; ρ – густина матеріалу, кг/м³; ν – коефіцієнт Пуассона.

Експериментальні дослідження. Експериментальні дослідження з виявлення та ідентифіка-

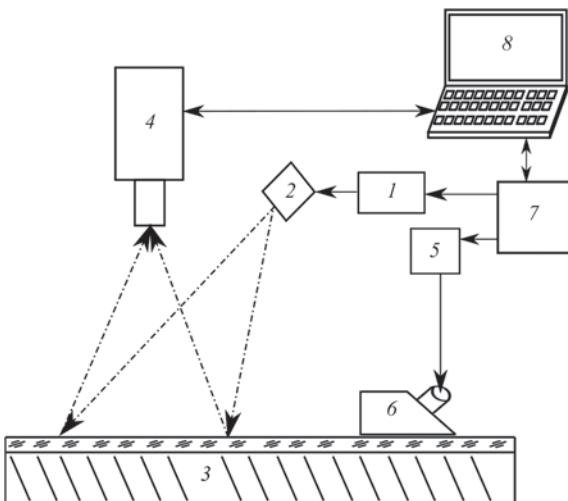


Рис. 1. Спрощена оптична схема макета ОАС: 1 – напівпровідниковий лазер з амплітудною модуляцією; 2 – розширювач лазерного променя; 3 – склопластикову шарувата структура, що містить шари склотекстоліту СТЕФ-1 та підповерхневі дефекти у середньому шарі; 4 – цифрова камера з об'єктивом; 5 – широкопугловий генератор сигналу для п'єзоперетворювача; 6 – п'єзоперетворювач; 7 – блок керування; 8 – комп'ютер

ції підповерхневих круглих площинних дефектів проведено на зразках склопластикових шаруватих структур розмірами 400×250 мм, кожен з яких був виготовлений із трьох пластин склотекстоліту СТЕФ-1 та епоксидно-фенольної полімерної смоли як сполучного матеріалу [10]. Нижній шар, пластина склотекстоліту СТЕФ-1 завтовшки 5 мм, забезпечував жорсткість структури. У середньому шарі, у пластині склотекстоліту завтовшки 1,5 мм, вирізали серію круглих і квадратних отворів. Виготовлені з того ж матеріалу верхні шари у зразках мають різну товщину. У зразку № 1 склопластикової шаруватої структури, який досліджували, верхній шар має товщину 0,41 мм, тобто глибина залягання дефектів у цьому зразку становить $h = 0,41$ мм. На рис. 2 зображено схему розташування круглих підповерхневих дефектів у виділеній секції зразка № 1 склопластикової шаруватої структури та їх діаметри, мм: 1 – 45; 2 – 35; 3 – 25; 4 – 20; 5 – група з п'яти дефектів діаметром від 1 до 14, 12, 10, 8, 6 мм

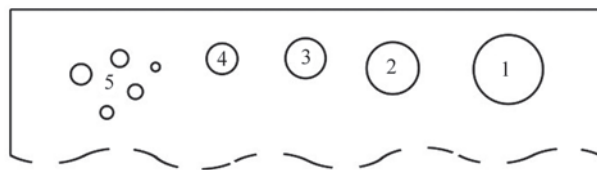


Рис. 2. Схема розташування круглих підповерхневих дефектів у виділеній секції зразка № 1 склопластикової шаруватої структури та їх діаметри, мм: 1 – 45; 2 – 35; 3 – 25; 4 – 20; 5 – група з п'яти дефектів діаметром від 1 до 14, 12, 10, 8, 6 мм

лектричного перетворювача 1...50 кГц. На рис. 3 зображено різниці ЦСЗ після застосування процедури ЦОЗ, на яких чітко виділилися оптичні просторові відгуки від круглих дефектів різних діаметрів.

У розробленому макеті ОАС реалізовано спосіб швидкого тестування досліджуваної поверхні в режимі реального часу. Для цього після встановлення всіх необхідних параметрів системи проводимо аналіз різниць ЦСЗ у широкому діапазоні зміни частоти збудження зразка пружною хвилею. Кожне різницеве ЦСЗ попіксельно аналізуємо на предмет перевищення певного наперед встановленого рівня шуму (РШ) і за умови його перевищення у конкретному пікселі зображення фіксуємо цю подію лічильником. Після такої перевірки для кожного різничевого ЦСЗ і для кожної заданої частоти збудження отримуємо M пікселів із перевищенням рівня шуму. Далі це число ділимо на повну кількість пікселів у зображенні та в результаті отримуємо відсоток від площі оптичного просторового відгуку від області інтересу, що перевищує рівень шуму, а, отже, може містити підповерхневий дефект. Під час цієї процедури для кожної частоти збудження у разі перевищення РШ відбувається збереження різничевого ЦСЗ. Отримане різницеве ЦСЗ у подальшому аналізуємо та опрацьовуємо за допомогою найпростіших алгоритмів цифрової обробки зображень (ЦОЗ).

Під час НК зразка № 1 за допомогою макета ОАС отримували різниці ЦСЗ поверхні зразка і аналізували оптичні просторові відгуки від дефектів №№ 1–4 у діапазоні зміни частоти п'єзо-

З аналізу зображень на рис. 3 можна простежити кореляцію між площами оптичних відгуків і площами відповідних дефектів, причому зі зменшенням розмірів дефектів відбувається зменшення площі відгуків від них. Так, наприклад, на рис. 3, а наведено оптичний відгук від підповерхневого дефекту № 1 діаметром 45 мм на резонансній частоті $f_{01} = 1,8$ кГц. На рис. 3, б на резонансній частоті $f_{01} = 2,8$ кГц зображено оптичний відгук від дефекту № 2 діаметром 35 мм. Однак відгук від круглого дефекту № 3 (рис. 3, в) на резонансній частоті $f_{01} = 4,6$ кГц є значно меншим за його діаметр, що можна пояснити занадто слабким відгуком поверхні зразка, викликаним значною відстанню між джерелом збудження та цим дефектом. Тому для отримання різниць ЦСЗ від решти тестових дефектів джерело збудження перемістили ближче до місця їх розташування. На рис. 3, г показано оптичний відгук від дефекту діаметром 20 мм на резонансній частоті $f_{01} = 7,6$ кГц, розмір якого також менший за розмір дефекту. Незважаючи на відсутність можливості точного визначення радіуса круглого підповерхневого дефекту, оцінювання його розміру є задовільним і достатнім для задач НК. На рис. 4 наведено покращені різниці ЦСЗ для групи дефектів № 5. На рис. 4, а, б, в зображено область поверхні зразка, де зосереджено чотири з п'яти дефектів групи № 5, у тому числі найбільший дефект діаметром 14 мм (рис. 4, а) отриманий на резонансній частоті $f_{01} = 13,8$ кГц. Найменший дефект з групи дефектів № 5 діаметром 6 мм у досліджуваному діапазоні частот побачити не вдалося. На рис. 4, б можна спостері-

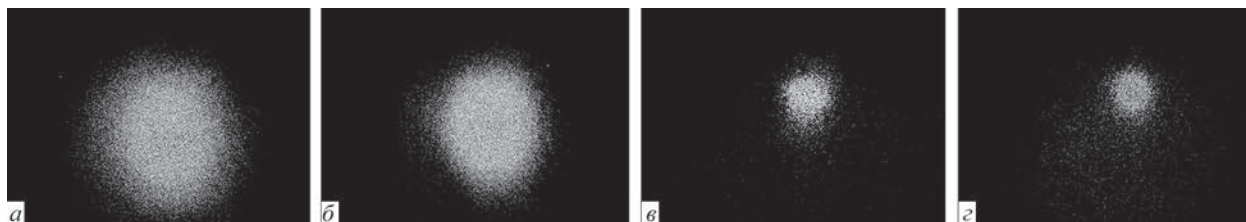


Рис. 3. Оптичні просторові відгуки від підповерхневих дефектів № 1 – діаметром 45 мм (а), № 2 – 35 (б), № 3 – 25 (в), № 4 – 20 (г), що виділилися на різницевих ЦСЗ

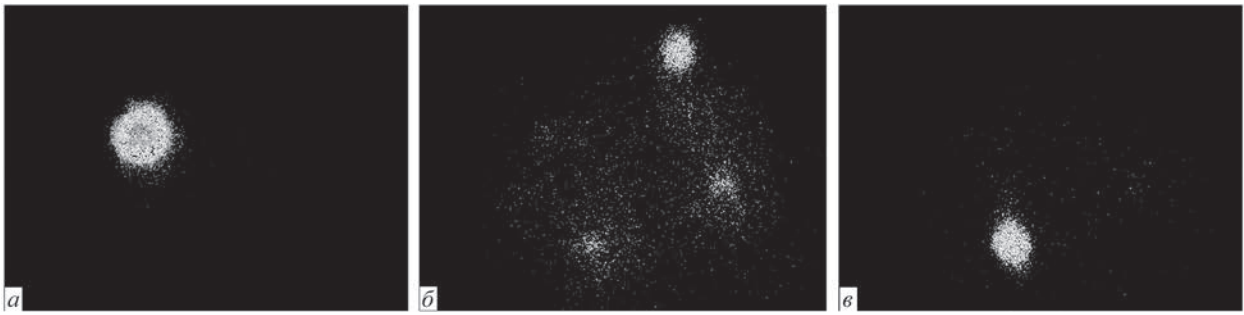


Рис. 4. Різницеві ЦСЗ групи підповерхневих дефектів № 5 (рис. 2), зафіксовані за найбільшої інтенсивності оптичних відгуків від дефектів діаметром 14 (а), 12 (б), 8 мм (в)

гати одночасно дефекти з діаметром 12, 10 і 8 мм на резонансній частоті $f_{01} = 21,6$ кГц. На цій частоті найбільший відгук формує дефект діаметром 12 мм. На рис. 4, в показано оптичний відгук від дефекту діаметром 8 мм на частоті $f_{01} = 35,8$ кГц.

На рис. 5 зображені теоретична (крива 1) та експериментальна (крива 2) залежності резонансної частоти f_{01} від розмірів підповерхневих дефектів у зразку № 1. Номерами помічені експериментальні дані, отримані для круглих дефектів, пронумерованих на рис. 2. Для отримання теоретичної залежності (кривої 1) використано формулу (2), значення параметрів якої взято з [10] на підставі експериментальних даних для склотекстолітової пластини СТЕФ-1. Тут глибина залягання дефекту $h = 0,41$ мм, модуль пружності $E = 23,3 \pm 1,3$ ГПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,14 \pm 0,02$ та густина матеріалу $\rho = (1,7 \pm 0,05) \cdot 10^3$ кг/м³.

Як показують отримані залежності, найкраща збіжність між ними спостерігається для радіуса круглого дефекту в межах 6...18 мм, що відповідає підповерхневим дефектам №№ 2–5. Незважаючи на це, результати дослідження свідчать про придатність використання формули (2) для встановлення глибини залягання дефекту з достатньою точністю в усьому дослідженому діапазоні. Відхилення експериментальних результатів від теоретичних, зображені на рис. 5, можна

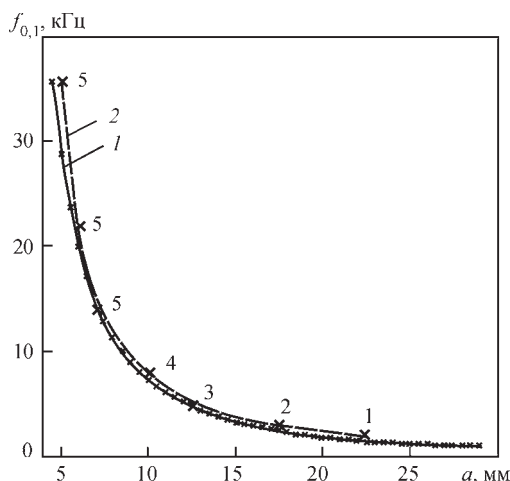


Рис. 5. Теоретична (1) та експериментальна (2) залежності резонансної частоти f_{01} від радіуса круглого дефекту a

пояснити, зокрема, недосконалістю формули (2) для визначення основної резонансної частоти f_{01} , відхиленнями у розмірах виготовлених дефектів, ортотропією матеріалу тощо. Одним із способів покращення точності визначення параметрів підповерхневого дефекту невідомих розмірів та глибини залягання є визначення не лише основної резонансної частоти f_{01} , але й частот вищого порядку. Визначивши ці частоти експериментально та використавши формулу (2), а також відповідні коефіцієнти для знаходження кратних резонансних частот для ізотропного матеріалу, можна за просторовою структурою оптичних відгуків експериментально визначити ці резонансні частоти, а відтак при незмінних параметрах поверхневого шару композитної пластини встановити глибину залягання дефекту. Зауважимо, що для круглого підповерхневого дефекту просторова структура оптичних відгуків на основній і кратних резонансних частотах відповідає структурі вузлів і пучностей круглої мембрани такого ж діаметра, що і діаметр дефекту, на тих же резонансних частотах.

Таким чином, результати досліджень круглих підповерхневих дефектів за допомогою макета ОАС та отримана експериментальна залежність резонансної частоти f_{01} від радіуса дефекту a на глибині залягання $h = 0,41$ мм свідчать про принципову можливість оцінювання площі підповерхневого дефекту та його геометричних параметрів.

Висновки

На основі розробленого ОАМ створено макет ОАС, який дає змогу виявляти підповерхневі дефекти в композитних шаруватих структурах за допомогою серій динамічних спекл-зображень поверхні шару композиту над дефектом, збудженого згинальною пружною хвилею, після реєстрації яких формують різницеві ЦСЗ і виявляють оптичні просторові відгуки від дефектів за їх наявності в полі зору цифрової камери. Формування динамічних спекл-зображень не вимагає використання додаткового опорного променя в ОАС, що дає можливість конструювати на її основі швидкодіючі оптико-цифрові пристрої НК підповерхневих дефектів, малочутливі до вібрацій та інших зовніш-

ніх факторів і здатні працювати в натурних умовах. Показано, що за допомогою різницевого ЦСЗ, отриманих на основних резонансних частотах f_{01} круглих підповерхневих дефектів, можна їх виявляти у склопластикових шаруватих структурах і визначати їх розміри з діаметрами в межах 8...45 мм.

Список літератури/References

1. Newman, J.W. (2012) *Laser Testing: Shearography & Holography*. Ed. by P.O. Moore. The Nondestructive Testing Overview, Columbus Ohio, American Society for Nondestructive Testing.
2. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A. (2014) Diagnostics of structures by the methods of electron shearography and speckle-interferometry. *Materials Sci.*, **49**, 442–448. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-014-9635-5>
3. Howell, P.A. (2020) *Nondestructive Evaluation (NDE) Methods and Capabilities: Handbook*, NASA/TM–2020-220568, Vol I. Langley Research Center, Hampton, VA, USA.
4. Nazarchuk, Z., Muravsky, L., Kuryliak, D. (2023) Digital speckle pattern interferometry for studying surface deformation and fracture of materials. In: *Optical Metrology and Optoacoustics in Nondestructive Evaluation of Materials*. Springer Series in Optical Sciences, **242**. Singapore: Springer, 149–217. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-1226-1_4
5. Chatters, T., Pouet, B., Krishnaswamy, S. (1992) *Shearography with Synchronized Pressure Stressing*. Eds. by D.O. Thompson, D.E. Chimenti, Review of Progress in Quantitative NDE, La Jolla, CA, Plenum Press, 426. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2848-7_54
6. Hung, Y.Y., Yang, L.X., Huang, Y.H. (2013) Non-destructive evaluation (NDE) of composites: Digital shearography. Ed. by V.M. Karbhari, In: *Non-destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites*. Cambridge, Philadelphia, New Delhi: Woodhead Publishing Limited, 84–115.
7. Muravsky, L., Kuts, O., Gaskevych, G., Suriadova, O. (2019) Detection of subsurface defects in composite panels using dynamic speckle patterns. In: *Proc. Of IEEE XI Inter. Scientific and Practical Conf. on Electronics and Information Technologies, 2019*, 7–10. DOI: <https://doi.org/10.1109/LIT.2019.8892294>
8. Nazarchuk, Z., Muravsky, L., Kuryliak, D. (2019) To the problem of the subsurface defects detection: Theory and experiment. *Procedia Structural Integrity*, **16**, 11–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.016>
9. Nazarchuk, Z.T., Muravsky, L.I., Kuts, O.G. (2022) Non-destructive testing of thin composite structures for subsurface defects detection using dynamic laser speckles. *Research in Nondestructive Evaluation*, **33**, 59–77. DOI: <https://doi.org/10.1080/09349847.2022.2049407>
10. Muravsky, L., Nazarchuk, Z., Kuts, O., Sharabura, O. (2023) Identification of internal planar square defects in composite panels using optoacoustic technique. In: *Proc. of IEEE 13th Inter. Conf. on Electronics and Information Technologies, ELIT 2023*, 265–269. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELIT61488.2023.10310846>
11. Nazarchuk, Z., Muravsky, L., Kuryliak, D. (2023) Methods for processing and analyzing the speckle patterns of materials surfaces. In: *Optical Metrology and Optoacoustics in Nondestructive Evaluation of Materials*. Springer Series in Optical Sci., **242**. Singapore: Springer, 249–323. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-1226-1_6
12. Timoshenko, S.P., Woinowsky-Krieger, S. (1959) *Theory of Plates and Shells*. 2nd Ed., McGraw-Hill, New York.
13. Leissa, A.W. (1969) *Vibration of Plates*. Scientific and Technical Information Division, National Aeronautics and Space Administration.
14. Li, W.L. (2004) Vibration analysis of rectangular plates with general elastic boundary supports. *J. of Sound and Vibration*, **273**(3), 619–635. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00562-5](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00562-5)
15. Guguloth, G.N., Singh, B.N., Ranjan, V. (2019) Free vibration analysis of simply supported rectangular plates. *Vibroengineering Procedia*, **29**, 270–273. DOI: <https://doi.org/10.21595/vp.2019.21135>
16. Chakraverty, S., Jindal, R. Agarwal, V.K. (2007) Effect of non-homogeneity on natural frequencies of vibration of elliptic plates. *Meccanica*, **42**, 585–599. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11012-007-9077-3>
17. Maiz, S., Rossit, C.A., Bambill, D.V., Susca, A. (2009) Transverse vibrations of a clamped elliptical plate carrying a concentrated mass at an arbitrary position. *J. of Sound and Vibration*, **320**(4–5), 1146–1163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.09.013>
18. Zhou, Z.H., Wong, K.W., Xu, X.S., Leung, A.Y.T. (2011) Natural vibration of circular and annular thin plates by Hamiltonian approach. *J. of Sound and Vibration*, **330**(5), 1005–1017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2010.09.015>
19. Anjomshoa, A., Tahani, M. (2016). Vibration analysis of orthotropic circular and elliptical nano-plates embedded in elastic medium based on nonlocal Mindlin plate theory and using Galerkin method. *J. of Mechanical Sci. and Technology*, **30**, 2463–2474. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-016-0506-x>
20. Cawley, P. (1984) The impedance method of non-destructive inspection. *NDT Intern.*, **17**(2), 59–65. DOI: [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(84\)90045-2](https://doi.org/10.1016/0308-9126(84)90045-2)
21. Cawley, P., Theodorakopoulos, C. (1989) The membrane resonance method of non-destructive testing. *J. of Sound and Vibration*, **130**(2), 299–311. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(89\)90555-5](https://doi.org/10.1016/0022-460X(89)90555-5)
22. Ma, C.C., Huang, C.H. (2004) Experimental whole-field interferometry for transverse vibration of plates. *J. of Sound and Vibration*, **271**(3–5), 493–506. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00276-1](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00276-1)
23. Bruno, F., Laurent, J., Prada, C. et al. (2014) Non-destructive testing of composite plates by holographic vibrometry. *J. of Applied Physics*, **115**(15), 154503. DOI: <https://dx.doi.org/10.1063/1.4871178>
24. Lamboul, B., Giraudo, O., Osmont, D. (2015) Detection of disbonds in foam composite assemblies using flexural waves and shearography. In: *AIP Conf. Proceedings*, **1650**(1), 1155–1161. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4914725>

DETECTION OF CIRCULAR SUBSURFACE DEFECTS IN LAMINATED COMPOSITES USING OPTICAL-ACOUSTIC NONDESTRUCTIVE TESTING SYSTEM

O.M. Sharabura, L.I. Muravsky, O.G. Kuts

G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine. E-mail: muravskyleon@gmail.com

An optical-acoustic system layout for nondestructive testing of subsurface defects in laminated composites is created. Detection and localization of subsurface defects in composite laminated structures with the help of the optical-acoustic system layout is performed by forming a series of dynamic speckle patterns of the composite surface, which is excited by a flexural elastic wave, their subsequent registration and accumulation in order to generate differential digital speckle patterns and extract optical spatial responses from defects. To assess the efficiency of detecting such defects, fiberglass laminated structures were manufactured containing three layers of glass textolite plates and circular flat defects of various sizes in the middle layer. Based on the conducted studies, an experimental dependence of the fundamental resonance frequency of circular subsurface defects on their sizes was obtained, which is close to the theoretically plotted one. It is shown that using the created optical-acoustic system layout, it is possible to detect such defects in a wide range of changes in their sizes. 24 Ref., 5 Fig.

Keywords: optical-acoustic system, dynamic speckle pattern, circular subsurface defect, region of interest, difference speckle pattern, elastic wave, laminated composite

Отримано 24.10.2024

Отримано у переглянутому вигляді 14.11.2024

Прийнято 20.12.2024