

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2026.01.003>

УДК 620.192:691.175.3:681.78

З.Т. Назарчук, <https://orcid.org/0000-0003-0402-0570>

Л.І. Муравський, <https://orcid.org/0000-0001-8839-2819>

О.М. Шарабура, <https://orcid.org/0000-0002-5712-4114>

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

E-mail: muravskyleon@gmail.com

Оптико-акустична діагностика ортотропних композитних структур

Представлена академіком НАН України Р.М. Кушніром

Запропоновано новий підхід до оцінювання розмірів круглих і еліптичних внутрішніх дефектів у ортотропних композитних структурах, який базується на теорії тонких пластин. Для обчислення основних резонансних частот коливань закріплених по краях круглої та еліптичної ортотропних пластин, розташованих безпосередньо над круглим і еліптичним дефектами, використано відомі співвідношення між вібраційними і пружними властивостями ортотропних матеріалів, отримані методами Релея—Рітца і Гальоркіна. При цьому розміри ортотропних пластин відповідають розмірам дефектів. Щоб експериментально перевірити отримані робочі формули для обчислення основних резонансних частот використано розроблений авторами оптико-акустичний метод виявлення та візуалізації внутрішніх дефектів. Цей метод включає збудження об'єкта контролю пружною хвилею з плавною зміною частоти та реєстрацію послідовності динамічних спекл-зображень синхронно з вібраціями дефекту. Накопичені послідовності вводять у комп'ютер і формують цифрові спекл-зображення. Після їх швидкісної обробки виділяють оптичні просторові відгуки від дефектів. Експерименти зі зразками клейових з'єднань “вуглецева композитна стрічка—бетон”, які містили штучні круглі і еліптичний міжфазні дефекти, виконували за допомогою макета оптико-цифрової системи, що реалізує оптико-акустичний метод. Виявляли такі дефекти під шаром непрозорої вуглецевої композитної стрічки на основних резонансних частотах. Показано, що розміри оптичних просторових відгуків близькі до розмірів дефектів. Експериментально визначені основні резонансні частоти дефектів близькі до відповідних частот, обчислених за отриманими робочими формулами. Вказаний підхід дає можливість оцінювати розміри дефектів та глибину їх залягання під поверхнею ортотропного композита.

Ключові слова: внутрішні дефекти, ортотропна композитна структура, пружна хвиля, ортотропна пластина, оптико-акустичний метод, основна резонансна частота, оптичний просторовий відгук.

Цитування: Назарчук З.Т., Муравський Л.І., Шарабура О.М. Оптико-акустична діагностика ортотропних композитних структур. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2026. № 1. С. 3—11. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2026.01.003>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Вступ. Серед широкого спектра методів і технологій технічної діагностики та неруйнівного контролю композитних структур для виявлення дефектів і пошкоджень важливу роль відіграють оптико-цифрові методи. Їх переваги в першу чергу пов'язані з можливістю одночасно обстежувати великі ділянки поверхні конструкцій, вводити в комп'ютер двовимірні масиви даних і обробляти їх у реальному часі. Серед них досить ефективними для виявлення та візуалізації внутрішніх дефектів вважаються методи цифрової спекл-інтерферометрії (ЦСІ) та електронної широгографії [1—3]. Однак існують проблеми з технічною реалізацією методів ЦСІ в натурних умовах, які пов'язані з необхідністю використання складних оптичних схем формування спекл-інтерферограм та високою їх чутливістю до різноманітних вібрацій, які призводять до невідворотних спотворень спекл-інтерферограм. Системи електронної широгографії практично нечутливі до вібрацій, однак оптичні схеми у них такі ж складні, як і схеми в цифрових спекл-інтерферометрах. Крім того, вказані методи використовують фазозсувні алгоритми під час виявлення внутрішніх дефектів, які потребують реєстрації мінімум трьох спекл-інтерферограм або широгограм однієї і тієї ж ділянки поверхні в початковому і в збудженому станах об'єкта контролю.

Автори розробили швидкісний оптико-акустичний метод виявлення та візуалізації внутрішніх дефектів [2, 4]. В оптико-цифровій системі (ОЦС), що реалізує цей метод, поєднано просту оптичну схему формування серій динамічних спекл-зображень поверхні композитної структури з її акустичним збудженням згинальними пружними хвилями. Оптична схема містить розширювач лазерного променя, що освітлює шорстку поверхню зразка, та оптичну систему реєстрації послідовності спекл-зображень поверхні. Швидкодія системи визначається частотою пружної хвилі, яка змінюється в межах від 1 до 150 кГц. Завдяки цьому поле дефектів з оптичними просторовими відгуками від них відтворюється на екрані комп'ютера практично в реальному часі. Хоча особливості впливу різних видів пружних хвиль на резонансні явища у внутрішніх дефектах ще до кінця не з'ясовані, проте показано, що їх спричиняють як SH-, так і SV-хвилі [2]. Зокрема, згинальні антисиметричні хвилі мають домінуючий вплив на виникнення резонансних коливань тих ділянок верхнього шару композита, які розташовані безпосередньо над дефектами і які можна розглядати як тонкі закріплені по краях пластини (області інтересу), розміри яких відповідають розмірам внутрішніх дефектів. Такий підхід до виникнення резонансних явищ у дефектах дає можливість використовувати теорію тонких пластин для встановлення взаємозв'язків між їх резонансними частотами та пружними властивостями верхнього шару композита і, зокрема, області інтересу, розташованої безпосередньо над дефектом. Особливу увагу привертають ортотропні композитні структури, які використовують у машинобудуванні, літакобудуванні, цивільному будівництві та інших галузях. Зокрема, в будівельній індустрії широко застосовують вуглецеві композитні стрічки типу Sika CarboDur для підвищення експлуатаційної надійності і довговічності елементів конструкцій та їх відновлення в разі пошкодження.

За допомогою створеного макета ОЦС автори виявляли штучні міжфазні дефекти (штучні непроклеї) у з'єднаннях “вуглецева композитна стрічка (ВКС)—бетон”. Для підтвердження результатів експерименту слід провести теоретичні розрахунки, які б засвідчили їх достовірність.

Мета. Мета роботи полягає у встановленні теоретичних залежностей між фундаментальними резонансними частотами таких дефектів та їх геометричними параметрами з вра-

хуванням пружних властивостей матеріалу, побудованих на основі теорії тонких пластин, і оцінюванні відповідності між отриманими залежностями і результатами експерименту.

Обчислення основних резонансних частот внутрішніх дефектів у ортотропних композитних структурах. Розглянемо внутрішні міжфазні дефекти, що часто трапляються в склотекстолітових панелях та клейових з'єднаннях “ВКС—бетон” у вигляді непроклеїв. Такі дефекти мають круглу або еліпсоподібну форму.

Для визначення основної резонансної частоти (ОРЧ) круглих внутрішніх дефектів у ізотропних матеріалах використовують відому формулу [5, 6]

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

де h — глибина залягання дефекту; r — радіус дефекту; ρ — густина ізотропної пластини над дефектом; E і ν — модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона пластини. Таку ж формулу використовують для виявлення круглих дефектів у композитних матеріалах, які мають анізотропні, зокрема, ортотропні властивості [7, 8]. Однак ця формула не придатна для односпрямованих композитів, які мають ортотропні властивості, а модулі пружності і модулі згину вздовж головних напрямів пружності у них відрізняються.

Пропонується принципово інший підхід до оцінювання розмірів та глибин залягання круглих та еліптичних непроклеїв у ортотропних композитних шаруватих панелях та клейових з'єднаннях ВКС з бетонними та іншими конструкційними елементами. У ньому для визначення основної резонансної частоти (ОРЧ) коливань f_{01} круглої закріпленої по краях ортотропної пластини, розташованої безпосередньо над круглим внутрішнім дефектом таких самих розмірів, використовуємо отриману методом Релея—Рітца формулу Релея—Лехніцького [5, 6]

$$f_{01} = \frac{6,33}{2\pi r^2} \sqrt{\frac{D_x + 0,667D_{xy} + D_y}{\rho h}}. \quad (2)$$

Тут D_x і D_y — згинальні жорсткості для головних напрямів пружності пластини; D_{xy} — ефективна жорсткість скручування пластини. Ці головні жорсткості описуються виразами [5, 6]

$$\left. \begin{aligned} D_x &= \frac{E_x h^3}{12(1-\nu_x \nu_y)} \\ D_y &= \frac{E_y h^3}{12(1-\nu_x \nu_y)} \\ D_{xy} &= D_x \nu_y + \frac{G_k h^3}{12} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

де $E_{\beta,x}$ і $E_{\beta,y}$ — модулі згину для головних напрямів пружності пластини (вздовж осей x і y відповідно); ν_x і ν_y — коефіцієнти Пуассона; G_k — модуль зсуву при крученні. Таку ж формулу (2) було отримано методом Гальоркіна в [9].

Підставляючи вираз (3) у (2), отримуємо робочу формулу для обчислення ОРЧ f_{01} для різних радіусів круглих внутрішніх дефектів під шаром ортотропного матеріалу:

$$f_{01} = \frac{6,33h}{2\pi\sqrt{\rho}} \cdot \frac{1}{r^2} \sqrt{\frac{E_{fl,x}}{12(1-\nu_x\nu_y)} + 0,667 \frac{\nu_y E_{fl,x}}{12(1-\nu_x\nu_y)} + 1,333 \frac{G_k}{12} + \frac{E_{fl,y}}{12(1-\nu_x\nu_y)}}. \quad (4)$$

Для визначення ОРЧ еліптичних ортотропних пластин у [9] використано метод Гальоркіна та функцію, що описує відхилення поверхні закріпленої по краях еліптичної пластини, і отримано такий вираз [6, 9]:

$$(2\pi f_{01,e})^2 = \frac{41,52}{\rho h} \left(\frac{D_x}{a^4} + \frac{2 D_{xy}}{3 a^2 b^2} + \frac{D_y}{b^4} \right), \quad (5)$$

де a і b — велика і мала півосі еліпса.

Підставивши (3) у (5), отримаємо робочу формулу для визначення ОРЧ для еліптичної ортотропної пластини (області інтересу) над дефектом, тобто для еліптичного внутрішнього дефекту:

$$f_{01,e} = \frac{3,72h}{2\pi\sqrt{\rho}} \sqrt{\frac{E_{fl,x}}{4a^4(1-\nu_x\nu_y)} + \frac{\nu_y E_{fl,x}}{6a^2 b^2(1-\nu_x\nu_y)} + \frac{G_k}{3a^2 b^2} + \frac{E_{fl,y}}{4b^4(1-\nu_x\nu_y)}}. \quad (6)$$

Зауважимо, що отримані формули (4) і (6) можна перетворити у відомі вирази для круглих і еліптичних внутрішніх дефектів у ізотропних матеріалах. Дійсно, якщо шар матеріалу над круглим дефектом є ізотропним, тобто модуль Юнга $E = E_{fl,x} = E_{fl,y}$, коефіцієнт Пуассона $\nu_x = \nu_y = \nu$, а зсув та інерція обертання не враховуються, тобто жорсткість $D_{xy} = 0$, то формула (4) зводиться до формули (1) для ОРЧ круглого внутрішнього дефекту в ізотропному матеріалі. Подібним чином можна отримати формулу для еліптичного дефекту в ізотропному матеріалі. Якщо не враховувати зсув та інерцію обертання, то у (3) маємо $D_{xy} = 0$, а також $E = E_{fl,x} = E_{fl,y}$, $\nu_x = \nu_y = \nu$, звідки

$$D_x = D_y = D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}. \quad (7)$$

Підставивши (7) у (5), отримаємо

$$f_{01e,i} = \frac{1,86h}{2\pi\sqrt{\rho}} \sqrt{\frac{E}{(1-\nu^2)} \cdot \left(\frac{1}{a^4} + \frac{1}{b^4} \right)}. \quad (8)$$

Експерименти з виявлення непроклеїв у з'єднаннях “вуглепластикова композитна стрічка—бетон”. Експериментальну перевірку отриманих формул для ОРЧ круглих і еліптичних внутрішніх дефектів здійснювали за допомогою макета ОЦС для виявлення внутрішніх дефектів з акустичним збудженням об'єктів контролю пружними хвилями [2, 4]. Зовнішній вигляд макета зображено на рис. 1.

Виготовлені тестові зразки клейових з'єднань “ВКС—бетон” вводили в макет ОЦС для виявлення штучних непроклеїв. На рис. 2, а зображено поле дефектів на виході ОЦС, що

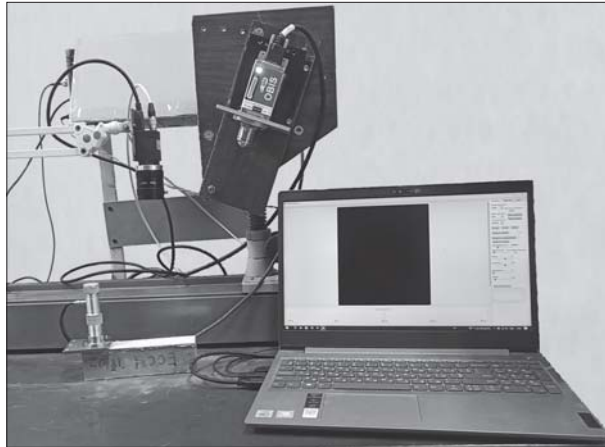


Рис. 1. Зовнішній вигляд макета ОЦС для виявлення внутрішніх дефектів

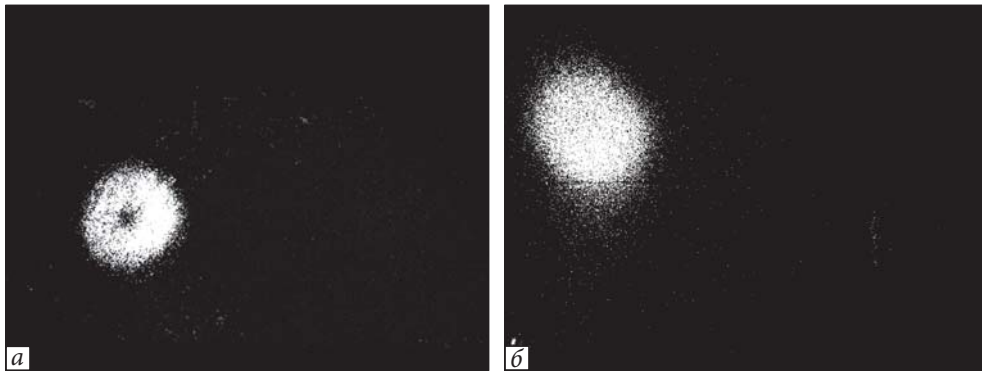


Рис. 2. Оптичні відгуки від круглих непоклеїв на полях дефектів, які охоплюють ділянки поверхні двох типів ВКС на основних резонансних частотах: *a* — відгук від непоклею $\varnothing 20$ мм на ОРЧ $f_{01,1}^{\text{exp}} = 41,8$ кГц; *б* — відгук від непоклею $\varnothing 23$ мм на ОРЧ $f_{01,2}^{\text{exp}} = 32,9$ кГц

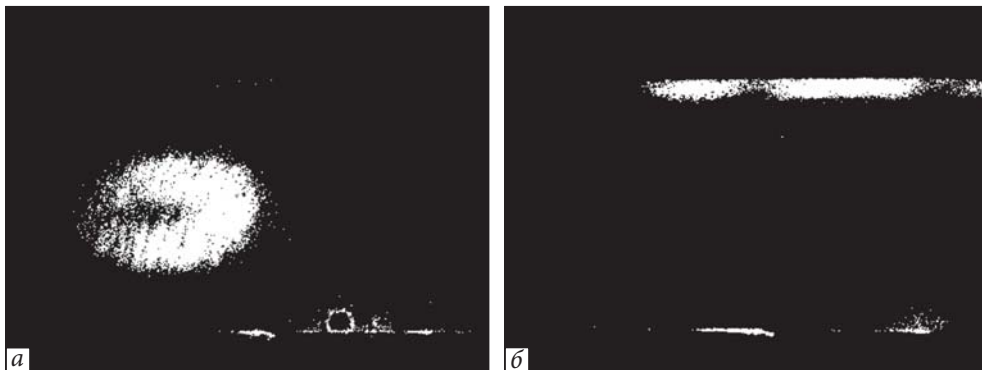


Рис. 3. Поля дефектів, що охоплюють ділянки поверхні ВКС площею $79,3 \times 60$ мм²: оптичний просторовий відгук від еліптичного непоклею на ОРЧ $f_{01e}^{\text{exp}} = 14,5$ кГц (*a*); оптичні відгуки від вузьких та довгих непоклеїв на протилежних краях ВКС на частоті $f_{01,3}^{\text{exp}} = 45,5$ кГц (*б*)

Результати вимірювання розмірів оптичних відгуків від круглих і еліптичного непроклеїв, а також результати експериментального визначення та обчислення основних резонансних частот непроклеїв

Тип непроклею	Розміри непроклею, мм	Розміри оптичного відгуку, мм	Експериментально отримані ОРЧ, кГц	ОРЧ, обчислені за формулами, кГц
Круглий	Ø 20	~Ø 18,5	41,8	42,9 ± 0,1
	Ø 23	~Ø 19	32,9	32,5 ± 0,1
Еліптичний	33 × 20	31,4 × 19	14,5	16,2 ± 0,1

охоплює ділянку поверхні ВКС Sika CarboDur M514 розмірами $79,3 \times 60 \text{ мм}^2$ і отримане під час контролю зразка клейового з'єднання “ВКС—бетон” розмірами $160 \times 40 \times 40 \text{ мм}^3$. Тут виділився на ОРЧ $f_{01,1}^{\text{exp}} = 41,8 \text{ кГц}$ оптичний відгук діаметром близько 18,5 мм від розташованого на глибині $h = 1,4 \text{ мм}$ від поверхні ВКС круглого непроклею діаметром 20 мм. На рис. 2, б зображено поле дефектів, що охоплює ділянку поверхні ВКС Sika CarboDur M1214 розмірами $65,8 \times 49,8 \text{ мм}^2$ і отримане під час контролю зразка клейового з'єднання “ВКС—бетон” розмірами $400 \times 100 \times 100 \text{ мм}^3$. На ньому виділився на ОРЧ $f_{01,2}^{\text{exp}} = 32,9 \text{ кГц}$ оптичний відгук діаметром близько 19 мм від розташованого на глибині $h = 1,4 \text{ мм}$ круглого непроклею діаметром 23 мм. На рис. 3 зображено поля дефектів, що охоплюють ділянки поверхні ВКС Sika CarboDur M514 розмірами $65,8 \times 49,8 \text{ мм}^2$ і отримані під час контролю зразка “ВКС—бетон” розмірами $160 \times 40 \times 40 \text{ мм}^3$. На рис. 3, а на ОРЧ $f_{01e}^{\text{exp}} = 14,5 \text{ кГц}$ виділився еліптичний оптичний відгук завширшки $2a_1 = 31,4 \text{ мм}$ і заввишки $2b_1 = 19 \text{ мм}$ від еліптичного непроклею завширшки $2a = 33 \text{ мм}$ і заввишки $2b = 20 \text{ мм}$. Розміри відгуку від цього непроклею менші від його розмірів приблизно на 5 %. Зменшення розмірів оптичних відгуків відносно розмірів дефектів зумовлене відсутністю декореляції між спеклами через малий нахил закріплених країв області інтересу під час вібрацій. Кільцеподібна структура відгуків на рис. 2, а і рис. 3, а також зумовлена відсутністю декореляції між спеклами у центральній зоні [2]. Отримані на рис. 3, б оптичні відгуки на частоті $f_{01,3}^{\text{exp}} = 45,5 \text{ кГц}$ вказують на наявність вузьких і довгих непроклеїв на двох протилежних краях композитної стрічки у зразку.

Порівняння експериментальних результатів з теоретичними розрахунками. Щоб розрахувати основні резонансні частоти за отриманими виразами (4) і (6) для круглих і еліптичних непроклеїв під стрічками Sika CarboDur M514 і Sika CarboDur M1214 ($h = 1,4 \text{ мм}$, густина $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$, коефіцієнт Пуассона $\nu_x = 0,3$), слід знайти модулі згину $E_{fl,x}$ і $E_{fl,y}$, а також коефіцієнт Пуассона ν_y . Дані про значення модуля зсуву під час кручення G_k узяті з [10], де показано, що для окремих шарів односпрямованого армованого пластику $G_k = 3,5 \dots 4,8 \text{ ГПа}$. Модулі згину $E_{fl,x}$ і $E_{fl,y}$ обох ВКС визначали згідно з міжнародним стандартом ASTM D790-17. Керуючись ним, вирізали серії тестових зразків для ВКС Sika CarboDur M514 і Sika CarboDur M1214 і, використовуючи 3-точкову систему згинального навантаження, встановили, що для них $E_{fl,x} = 160 \pm 2,5 \text{ ГПа}$, $E_{fl,y} = 9,5 \pm 0,5 \text{ ГПа}$ з 90 % довірчим інтервалом. Щоб визначити коефіцієнт Пуассона ν_y , використали відому залежність $\nu_x/E_x = \nu_y/E_y$ і отримали $\nu_y = 0,0178$. Підставляючи відомі і експериментально встановлені значення h , ρ , ν_x , $E_{fl,x}$, $E_{fl,y}$, ν_y і $G_k = 3,5 \dots 4,8 \text{ ГПа}$ у формулу (4), отримали

основні резонансні частоти $f_{01,1} = 42,9 \pm 0,1$ кГц для круглого непроклею діаметром 20 мм (відгук на рис. 2, а) та $f_{01,2} = 32,5 \pm 0,1$ кГц для непроклею діаметром 23 мм (відгук на рис. 2, б). ОРЧ для еліптичного непроклею (відгук на рис. 3, а) обчислювали за формулою (6) і отримали $f_{01e} = 16,2 \pm 0,1$ кГц. У таблиці наведено результати вимірювання розмірів оптичних просторових відгуків від круглих і еліптичного непроклеїв, а також результати експериментального визначення ОРЧ виявлених непроклеїв та обчислення ОРЧ f_{01} і f_{01e} за формулами (4) і (6).

Як бачимо, ОРЧ $f_{01,1}$ для круглого непроклею ($\varnothing 20$ мм) перевищує ОРЧ $f_{01,1}^{\text{exp}} = 41,8$ кГц на 1,1 кГц, а ОРЧ f_{01e} для еліптичного непроклею перевищує ОРЧ $f_{01e}^{\text{exp}} = 14,5$ кГц на 1,7 кГц, тоді як різниця між ОРЧ $f_{01,2}$ і $f_{01,2}^{\text{exp}} = 32,9$ кГц для круглого непроклею ($\varnothing 23$ мм) становить всього 0,4 кГц. Такі відхилення теоретичних ОРЧ від експериментальних пояснюються зменшенням відношення розмірів дефектів до глибини їх залягання $h = 1,4$ мм, що призводить до зміщення ОРЧ, розрахованих за формулами (4) і (6), у бік більших значень. Вказані зміщення встановлено у низці праць, зокрема в [11].

Висновки. Запропоновано новий підхід до оцінювання розмірів круглих та еліптичних внутрішніх дефектів у ортотропних композитних структурах, у якому поєднано методи оптичного моніторингу стану конструкцій з акустичними методами збудження композитів пружними хвилями. Базуючись на теорії тонких пластин, отримано робочі формули для обчислення основних резонансних частот внутрішніх дефектів. Відомі методи оцінювання резонансних частот для таких дефектів у ортотропних елементах конструкцій використовують формули для ізотропних матеріалів, які не враховують їх ортотропні властивості. Щоб обчислити основні резонансні частоти круглої і еліптичної ортотропних пластин над дефектом за отриманими робочими формулами, експериментально визначали модулі згину і коефіцієнти Пуассона для двох головних напрямків ортотропії та оцінювали значення модуля жорсткості для стрічок Sika CarboDur M514 і Sika CarboDur M1214. Під час виявлення непроклеїв у тестових зразках з'єднань “ВКС—бетон” за допомогою макета ОЦС підтверджено задовільний збіг експериментально визначених ОРЧ із обчисленими за робочими формулами. За встановленими ОРЧ дефекту і розмірами оптичного просторового відгуку від нього можна оцінити глибину залягання дефекту h . Підвищення точності визначення h досягається шляхом додаткових процедур експериментального встановлення і теоретичного розрахунку кратних резонансних частот даного дефекту.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Non-destructive evaluation (NDE) of polymer matrix composites: Karbhari V.M. (Ed.). Woodhead Publishing Limited, 2013. 716 p.
2. Nazarchuk Z., Muravsky L., Kuryliak D. Optical Metrology and optoacoustics in nondestructive evaluation of materials. Singapore: Springer, 2023. 401 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-99-1226-1>
3. Lobanov L.M., Shutkevych O.P., Kyyanets I.V., Shkurat I.L., Shyyan K.V., Savitsky V.V. Detection of internal ultra-small defects in aluminium welded joints by the shearography method. *Paton Weld. J.* 2025. Iss. 2. P. 38—41.
4. Muravsky L., Nazarchuk Z., Kuts, O., Ivanytskyi Y., Sharabura O. Detecting of interfacial defects in CFRP–concrete bonded joints using dynamic speckle patterns of excited surface. *NDT E Int.* 2025. **156**. 103480. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2025.103480>
5. Lekhnitskii S.G. Anisotropic plates. New York etc.: Gordon and Breach Science Publishers, 1968. 546 p.
6. Leissa A.W. Vibration of plates. Washington: National Aeronautics and Space Administration. 1969. 353 p.
7. Yu T., Cheng T.K., Zhou, A., Lau D. Remote defect detection of FRP-bonded concrete system using acoustic-laser and imaging radar techniques. *Constr. Build. Mater.* 2016. **109**. P. 146—155. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.113>
8. Qiu Q., Lau D. Defect detection of FRP-bonded civil structures under vehicle-induced airborne noise. *Mech. Syst. Signal Process.* 2021. **146**. 106992. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106992>
9. Reddy D.V., Rajappa N.R. Frequency analysis of certain interconnected beam systems. *Appl. Sci. Res. Sec. A.* 1964. **12**, № 4. P. 407—416. <https://doi.org/10.1007/BF03185010>
10. Mottram J.T. Shear modulus of standard pultruded fiber reinforced plastic material. *J. Compos. Constr.* 2004. **8**, № 2. P. 141—147. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2004\)8:2\(141\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:2(141))
11. Crosbie R.A., Dewhurst R.J., Palmer S.B. Flexural resonance measurements of clamped and partially clamped disks excited by nanosecond laser pulses. *J. Appl. Phys.* 1986. **59**, № 6. P. 1843—1848. <https://doi.org/10.1063/1.336410>

Надійшла до редакції 05.12.2025

REFERENCES

1. Karbhari, V. M. (Ed.). (2013). Non-destructive evaluation (NDE) of polymer matrix composites. Woodhead Publishing Ltd.
2. Nazarchuk, Z., Muravsky, L. & Kuryliak, D. (2023). Optical metrology and optoacoustics in nondestructive evaluation of materials. Singapore: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-99-1226-1>
3. Lobanov, L. M., Shutkevych, O. P., Kyyanets, I. V., Shkurat, I. L., Shyyan, K. V. & Savitsky V. V. (2025). Detection of internal ultra-small defects in aluminium welded joints by the shearography method. *Paton Weld. J.*, Iss. 2, pp. 38-41.
4. Muravsky, L., Nazarchuk, Z., Kuts, O., Ivanytskyi, Y. & Sharabura, O. (2025). Detecting of interfacial defects in CFRP–concrete bonded joints using dynamic speckle patterns of excited surface. *NDT E Int.*, 156, 103480. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2025.103480>
5. Lekhnitskii, S. G. (1968). Anisotropic plates. New York etc.: Gordon and Breach Science Publishers.
6. Leissa, A. W. (1969). Vibration of plates. Washington: National Aeronautics and Space Administration.
7. Yu, T., Cheng, T. K., Zhou, A. & Lau, D. (2016). Remote defect detection of FRP-bonded concrete system using acoustic-laser and imaging radar techniques. *Constr. Build. Mater.*, 109, pp. 146-155. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.113>
8. Qiu, Q. & Lau, D. (2021). Defect detection of FRP-bonded civil structures under vehicle-induced airborne noise. *Mech. Syst. Signal Process.*, 146, 106992. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106992>
9. Reddy, D. V. & Rajappa, N. R. (1964). Frequency analysis of certain interconnected beam systems. *Appl. Sci. Res. Sec. A*, 12, No. 4, pp. 407-416. <https://doi.org/10.1007/BF03185010>
10. Mottram, J. T. (2004). Shear modulus of standard pultruded fiber reinforced plastic material. *J. Compos. Constr.*, 8, No. 2, pp. 141-147. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2004\)8:2\(141\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:2(141))
11. Crosbie, R. A., Dewhurst, R. J. & Palmer, S. B. (1986). Flexural resonance measurements of clamped and partially clamped disks excited by nanosecond laser pulses. *J. Appl. Phys.*, 59, No. 6, pp. 1843-1848. <https://doi.org/10.1063/1.336410>

Received 05.12.2025

Z.T. Nazarchuk, <https://orcid.org/0000-0003-0402-0570>

L.I. Muravsky, <https://orcid.org/0000-0001-8839-2819>

O.M. Sharabura, <https://orcid.org/0000-0002-5712-4114>

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

E-mail: muravskyleon@gmail.com

OPTICAL-ACOUSTIC DIAGNOSTICS OF ORTHOTROPIC COMPOSITE STRUCTURES

A new approach to estimating the sizes of circular and elliptical internal defects in orthotropic composite structures based on the theory of thin plates is proposed. To calculate the fundamental resonance frequencies of circular and elliptical orthotropic plates clamped around their entire perimeter and located directly above circular and elliptical defects, known relationships between the vibrational and elastic properties of orthotropic materials, obtained by the Rayleigh-Ritz and Galerkin methods, were used. In this case, the dimensions of the orthotropic plates match those of the defects. To experimentally verify the obtained working formulas for calculating the fundamental resonance frequencies, an optical-acoustic method for detecting and visualizing internal defects developed by the authors was used. This method involves exciting the test object with a frequency chirping elastic wave and recording a sequence of dynamic speckle patterns synchronously with the defect vibrations. The accumulated sequences are entered into a computer and form digital speckle patterns. After their high-speed processing, optical spatial responses from defects are extracted. Experiments with samples of adhesive joints “carbon fiber reinforced polymer tape-concrete” containing artificial circular and elliptical interfacial defects were performed using an optical-digital system prototype implementing the optical-acoustic method. We detected such defects under a carbon composite tape layer at the fundamental resonance frequencies and showed that the sizes of the optical spatial responses from them are close to their sizes. The experimentally determined fundamental resonance frequencies of defects are close to the corresponding frequencies calculated using the obtained working formulas. The indicated approach makes it possible to estimate the size of the defects and their depth under the orthotropic composite surface.

Keywords: *internal defects, orthotropic composite structure, elastic wave, orthotropic plate, optical-acoustic method, fundamental resonance frequency, optical spatial response.*