

УДК 620.179:681.7

Л. Муравський, д.т.н., проф., чл.-кор. НАН України, О. Куць, Г. Гаськевич  
Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, Україна

## ОПТИКО-АКУСТИЧНИЙ МЕТОД ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ВНУТРІШНІХ ДЕФЕКТІВ У КОМПОЗИТНИХ СТРУКТУРАХ

L. Muravsky, Dr., Prof., Corresponding Member of the NAS of Ukraine, O. Kuts,  
G. Gaskevych

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

## OPTICAL-ACOUSTIC METHOD FOR DETECTING INTERNAL DEFECTS IN COMPOSITE STRUCTURES

**Abstract.** An optical-acoustic method for detecting internal defects in laminated composite structures is considered. In this method, the detection of such defects is performed by producing an optical response from a thin layer of material located directly above the defect. To implement the method, a hybrid optical-digital system with ultrasonic excitation of composite panels in the frequency sweep mode was created. Results of artificial and real defects detection are shown.

Запропоновано оптико-акустичний метод виявлення внутрішніх дефектів у шаруватих композитних структурах. Метод базується на новому підході до їх виявлення шляхом формування та візуалізації модової структури коливань поверхні тонкого шару матеріалу (області інтересу (ОІ)), розташованого безпосередньо над дефектом. Коливання ОІ відбуваються на її резонансних частотах, які відповідають резонансним частотам тонкої закріпленої по краях мембрани під дією згинальних ультразвукових (УЗ) хвиль. Під дією УЗ-випромінювання у верхньому шарі над дефектом, тобто в ОІ, поширюються згинальні хвилі. Якщо частота хвилі збігається із резонансною частотою ОІ, то ОІ починає вібрувати на цій частоті. Згинальні хвилі під час поширення у матеріалі діють на нього у напрямі, поперечному до напрямку поширення УЗ-хвилі. Тому коливання ОІ від площини поверхні композиту відбувається у тому ж напрямі. Якщо ОІ та прилегло до нього поверхню композиту освітлювати лазерним випромінюванням під час коливання ОІ, то в оптичній системі шорстка поверхня композиту, що містить ОІ, формує спекл-зображення, яке містить локальне спекл-зображення (ЛСЗ) області інтересу, оточене рівномірним фоном. Під час коливань ОІ відбувається нахил її елементів, а під час нахилу оптично шорсткої поверхні відбувається зсув спектра  $\Delta\nu$  просторових частот ОІ в апертурі А об'єктива О оптичної системи, що призводить до розмиття спеклів і зміни контрасту у ЛСЗ, як це показано на Рис. 1. В результаті виникає оптичний просторовий відгук в межах ЛСЗ, структура якого залежить від кратності резонансної частоти. Оскільки нахил вузлів ОІ, яку розглядаємо як тонку закріплену по краях мембрану, відбувається практично лише у поперечному напрямі, то у ЛСЗ формуються світлі плями від вузлів мембрани, що нахиляються у цьому ж напрямі. Світлі плями в межах ЛСЗ формують просторові відгуки від дефекту. Для отримання відгуку від дефекту накопичують одне спекл-зображення  $I_{q,o}(k,l)$  за допомогою цифрової камери під час коливань УЗ хвилі в одному напрямі, а друге  $I_{q,e}(k,l)$  – під час коливань УЗ хвилі у протилежному напрямі, а потім віднімають одне від одного, отримуючи мапу дефектів у вигляді різницевого спекл-зображення

$$I_q(k,l) = |I_{q,o}(k,l) - I_{q,e}(k,l)|. \quad (1)$$

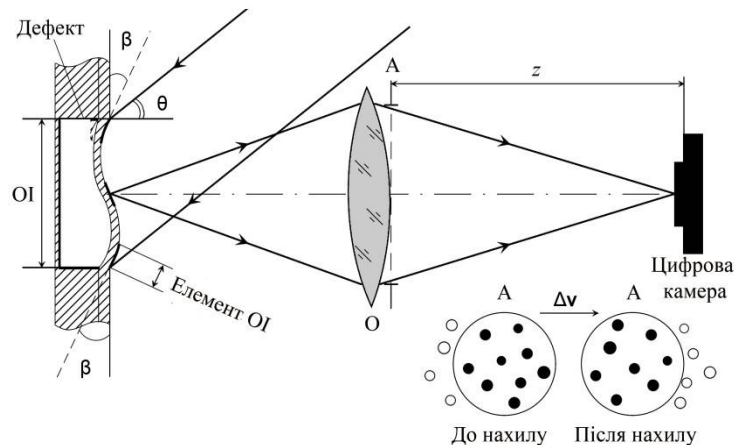


Рис. 1. Оптична схема формування спекл-зображень, що генеруються шорсткою поверхнею композиту, частину якої займає ОІ:  $\theta$  – кут падіння лазерного випромінювання;  $z$  – відстань між апертурою об’єктива та матричним фотодетектором;  $\beta$  – кут нахилу елемента ОІ до незбудженої площини композиту;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

Для реалізації методу створено макет гібридної оптико-цифрової системи (ГОЦС), у якій УЗ збудження зразка шаруватого композитного матеріалу відбувається в режимі частотної розгортки в діапазоні 5÷150 кГц. Виявляли штучні дефекти на різних глибинах залягання  $h$  у шаруватих склопластикових панелях на фундаментальних резонансних частотах (ФРЧ) і кратних резонансних частотах (КРЧ). На Рис. 2,а зображено змодельовані вузли від квадратної тонкої мембрани (квадратної ОІ) на ФРЧ  $f_{11}$  у вигляді світлих плям, де штриховою лінією позначено напрями, перпендикулярні до напрямку поширення УЗ-хвилі. На Рис. 2,б,в наведені відгуки від штучного квадратного дефекту (ШКД) розмірами  $20 \times 20 \times 1,5$  мм<sup>3</sup> на глибині залягання  $h = 0,41$  мм, які сформовані на ФРЧ  $f_{11} = 12,2$  кГц. Відгук на Рис. 2,б отримано в реальному часі за допомогою алгоритму формування РСЗ, а відгук на Рис. 2,в – в результаті обробки початкового відгуку за допомогою низькочастотної фільтрації (НЧФ) РСЗ.

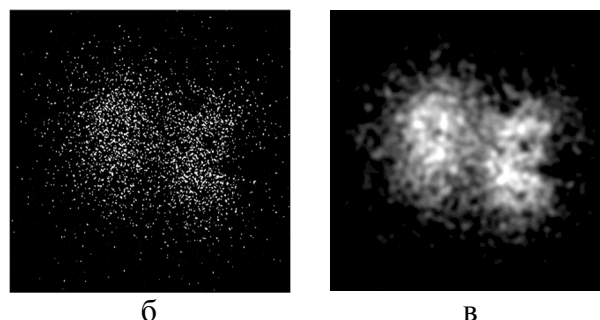


Рис. 2. Просторовий відгук від ШКД на ФРЧ  $f_{11}$ : змодельовані вузли від квадратної тонкої мембрани на ФРЧ  $f_{11}$  (а); реальний відгук від ШКД розмірами  $20 \times 20 \times 1,5$  мм<sup>3</sup> на глибині залягання  $h = 0,41$  мм у склопластиковій композитній панелі на ФРЧ  $f_{11} = 12,2$  кГц (б); результат обробки реального відгуку за допомогою НЧФ РСЗ (в).

Після реєстрації просторових відгуків від вибраного ШКД будували залежності ФРЧ та КРЧ від глибини залягання дефекту. Для побудови теоретичних залежностей

використовували відому формулу для ФРЧ збудження квадратного дефекту зі стороною  $a$  [1], тобто

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

та формули, що пов'язують КРЧ із ФРЧ [2]. Тут  $E$  – модуль згину для матеріалу пластини над дефектом;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона для матеріалу;  $\rho$  – густина матеріалу.

На Рис. 3 зображено експериментальні залежності резонансних частот  $f_{11}, f_{12}, f_{13}$ , а також резонансних частот  $f_{11}^t, f_{12}^t, f_{13}^t$  від глибини залягання  $h$  штучного дефекту розмірами  $20 \times 20 \times 1,5$  мм<sup>3</sup> у шаруватих склопластикових панелях. Як показують отримані залежності, зі зростанням  $h$  монотонно зростають фундаментальна резонансна частота  $f_{11}$ , а також кожна кратна резонансна частота  $f_{12}$  і  $f_{13}$ . Спостерігали також формування просторових відгуків на кратних резонансних частотах  $f_{14}$  і  $f_{15}$ . Порівняння цих двох груп залежностей свідчить про відхилення експериментальних результатів від теоретичних. Виявлені невідповідності між цими залежностями можна пояснити, зокрема, малими розмірами дефекту, обмеженими розмірами панелей та відхиленнями напряму генерування УЗ хвиль.

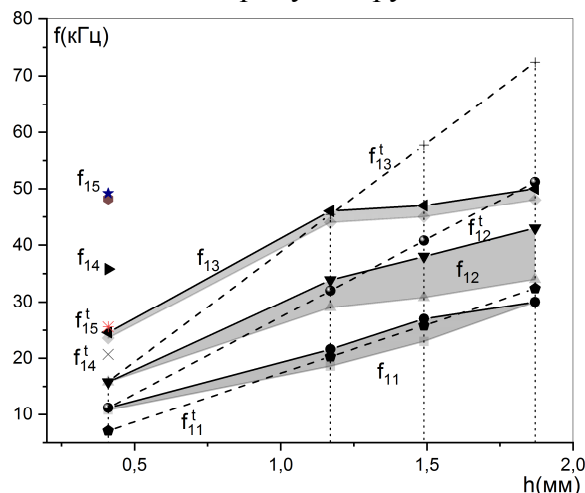


Рис. 3. Залежності резонансних частот  $f_{11}, f_{12}, f_{13}$ , одержаних для ШКД  $20 \times 20 \times 1,5$  мм<sup>3</sup>, а також відповідних частот  $f_{11}^t, f_{12}^t, f_{13}^t$ , обчислених за формулою (2), від глибини залягання  $h$  штучного дефекту. Частоти  $f_{11}$ : ● – ◆;  $f_{12}$ : ▼ – ▲;  $f_{13}$ : ◀ – ◆;  $f_{14}$ : ▶;  $f_{15}$

За допомогою створеного макета ГОЦС виявляли внутрішні дефекти у шаруватих композитних елементах конструкцій авіакосмічної техніки, зокрема, внутрішні дефекти у чарункуватих панелях, які прикріплюють до нижньої частини фюзеляжу літака. Виявляли також внутрішній дефект у вуглепластиковому композитному елементі метало-композитного з'єднання. Дефект виник біля правого верхнього отвору внаслідок прикладання статичного навантаження розтягу  $44 \cdot 10^3$  Н, що призвело до зсуву і розшарування внутрішніх шарів композиту.

#### Література.

1. 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.
2. Араманович И.Г, Левин В.И. Уравнения математической физики, 2-е изд.. М.: Наука, 1969, 288 с.