

НОВІ МЕТОДИКИ ТА ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ І ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ РОБОТИ МЕТАЛО-КОМПОЗИТНИХ З'ЄДНАНЬ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ*

Л.І. Муравський, Т.І. Вороняк, Я.Л. Іваницький, М.М. Гвоздюк, О.П. Максименко, О.Г. Куць, І.В. Сташишин, Г.І. Гаськевич, О.Д. Сурядова

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

Розроблено методику виявлення підповерхневих дефектів у шаруватих композитних структурах шляхом відслідковування динамічних змін оптичних спеклів на зображеннях поверхні безпосередньо над дефектом під дією резонансного ультразвукового збудження та методику визначення полів деформацій біля навантажених отворів у композитах для різних режимів їх свердління за допомогою переносного оптико-цифрового корелятора. Наведені результати досліджень з визначення напружень змінання у багаторядних болтових з'єднаннях «композит-метал» за деформацією в околі одиничного отвору, контактено навантаженого через болт. Бібліогр. 13, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: підповерхневі дефекти, композитна панель, метало-композитне з'єднання, спекл-зображення, динамічні спекли, ультразвукове збудження, овалізація отвору, цифрова кореляція зображень, напруження змінання, болтове з'єднання, поле деформації

Під час виконання роботи були розроблені методики неруйнівного контролю і діагностики композитних елементів конструкцій та метало-композитних з'єднань авіаційної техніки для підвищення надійності та ресурсу їх роботи. Методики базувались на побудові та аналізі тривимірних полів переміщень поверхні композитів та контактуючих поверхонь у з'єднаннях «метал-композит» за силового навантаження, а також на оцінюванні ступеня пошкодження і змінання елементів з'єднань та виявлення внутрішніх дефектів у композиті засобами спекл-метрології. Розглянемо дві основні розроблені методики, а саме:

- методику виявлення підповерхневих дефектів у шаруватих композитних структурах;
- розрахунково-експериментальну методику з визначення допустимих напружень змінання у багаторядних болтових з'єднаннях «композит-метал» методом цифрової кореляції зображень (ЦКЗ).

Методика виявлення підповерхневих дефектів у шаруватих композитних структурах. Розвиток неруйнівних методів і систем для виявлення прихованих дефектів у багатошарових композитах є важливим напрямком досліджень в аерокосмічній і автомобільній промисловості. За останні роки було створено низку оптоелектронних інтерферометричних систем, що могли вирішити цю проблему в лабораторних умовах. Однак такі системи дуже чутливі до зовнішніх вібрацій, а також до повітряних і теплових потоків. Тому вони

потребують використання додаткового антивібраційного і захисного обладнання, що ускладнює їх практичне використання. Тому створення більш простих систем, що дають змогу виявляти підповерхневі дефекти в шаруватих композитних панелях, є актуальною проблемою. Один з можливих шляхів її розв'язання полягає у розробленні нових методів виявлення дефектів з використанням ефекту динамічних спеклів. У зв'язку з цим було запропоновано метод, заснований на оцінці динаміки руху спеклів на різних ділянках поверхні досліджуваної композитної структури [1, 2].

Рух спеклів у медичних і біологічних об'єктах, спричинений їхньою життєвою активністю, успішно використовували у медико-біологічних дослідженнях [3–5]. З метою виявлення внутрішніх розшарувань та інших дефектів у шаруватих композитах і композитних з'єднаннях було запропоновано генерувати динамічні спекли шляхом гармонічного ультразвукового (УЗ) збудження досліджуваної структури [1, 2]. Принцип дії запропонованого методу заснований на виділенні локальних ділянок поверхні області інтересу (ОІ), розташованих безпосередньо над прихованим дефектом. Виділення ОІ, оточеної фоновим просторовим шумом, еквівалентне виявленню дефекту, а розміри та форма ОІ близькі до розмірів та форми дефекту.

Шарувату композитну панель збуджують УЗ хвилями різної частоти. Кожен прихований дефект в залежності від своїх розмірів та форми по-

* За результатами виконання цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» («Ресурс»), отриманих за 2016–2020 рр.

© Л.І. Муравський, Т.І. Вороняк, Я.Л. Іваницький, М.М. Гвоздюк, О.П. Максименко, О.Г. Куць, І.В. Сташишин, Г.І. Гаськевич, О.Д. Сурядова, 2020

чинає коливатися на своїй власній основній або кратній резонансній частоті, якщо основна частота збігається зі змінною в часі частотою УЗ хвилі. Коливання дефекту викликають періодичні нормальні коливання ОІ. Оскільки УЗ збудження діє в режимі сканування частоти, усі дефекти, що мають резонансні частоти в заданих межах, починають генерувати коливання ОІ. Отже, кожен дефект, який вібує на резонансній частоті, може викликати локальні коливання ОІ над дефектом. З іншого боку, коливання на цій частоті відсутні або дуже незначні в ділянках досліджуваної панелі за межами ОІ. Якщо оптично шорстку поверхню панелі освітлюють лазерним пучком, то на матриці фотоприймачів в площині цифрової камери формуються спекл-зображення (СЗ) поверхні панелі, яку збуджують УЗ хвилями. Якщо частота УЗ хвилі збігається з резонансною частотою дефекту, розташованого у полі зору цифрової камери, поверхня в межах ОІ починає коливатися на основній або кратній резонансних частотах. Рух поверхні спричинює випадковий рух спеклів, або так зване «мерехтіння» спеклів, яке в найбільшій мірі проявляє себе під час зміни нахилу ділянок ОІ відносно площини поверхні. Завдяки цьому відбувається просторово-часова зміна контрасту на ділянках максимальних змін швидкості і нахилу в межах ОІ. Навпаки, спекли поза межами ОІ або не рухаються, або ж рухаються зі значно меншими швидкостями, тобто рух спеклів є більш інтенсивний в межах ОІ та менш інтенсивний або взагалі відсутній поза її межами. Як наслідок, спекли в межах ОІ розмиваються, їхня інтенсивність змінюється, і контраст спеклів на певних ділянках ОІ відрізняється від контрасту оточуючого фону, внаслідок чого ОІ чітко виділяється на цьому фоні.

Для візуалізації підповерхневого дефекту в межах ОІ записують дві послідовності СЗ під час гармонічного УЗ збудження досліджуваної панелі. Кожне СЗ формують в результаті попиксельного додавання K так званих елементарних спекл-зображень, які фіксують під час однієї короткої експозиції. Кожне СЗ із першої послідовності формується шляхом накопичення K елементарних СЗ з розподілами інтенсивності $I_{k,n1}(i,j)$, де i, j – номери пікселів у СЗ. Ці елементарні СЗ реєструють цифровою камерою за час її експозиції T з часовим проміжком τ , який починається з часовою затримкою δ_t відносно максимуму УЗ хвилі в межах її півперіоду $T_{US}/2$ ($\tau < T_{US}/2$, $\delta_t < T_{US}/2$). Кожне СЗ з другої послідовності формується відразу після попереднього СЗ шляхом накопичення K елементарних СЗ $I_{k,n2}(i,j)$, зареєстрованих тією самою камерою з тим самим часовим проміжком τ і часовою затримкою δ_t відносно мінімуму УЗ хвилі в межах її півперіоду $T_{US}/2$. Отже, послідовності містять N

пар СЗ, і кожна n -та пара ($n = 1, 2, \dots, N$) складається із СЗ з розподілами інтенсивності $I_{n,o}(i,j)$ та $I_{n,e}(i,j)$ відповідно, які можна записати так:

$$I_{n,o}(i,j) = \sum k [I_{k,n} 1(i,j)], I_{n,e}(i,j) = \sum k [I_{k,n} 2(i,j)]. \quad (1)$$

Оскільки часові проміжки τ значно менші за час експозиції T цифрової камери, для їх генерування необхідно використовувати швидкісний оптичний затвор, наприклад акустооптичний дефлектор (АОД) або електрооптичний модулятор.

Оцінка динамічних характеристик спеклів в межах ОІ та поза її межами може бути здійснена з використанням сигнальних дескрипторів, проаналізованих зокрема у [6]. Проте специфіка реєстрації СЗ $I_{n,o}(i,j)$ та $I_{n,e}(i,j)$ змусила запропонувати диференціальний дескриптор динамічних спеклів, рівний абсолютному значенню різниці між кожною n -ю парою СЗ або різницевому спекл-зображенню, тобто

$$I_{n,\cdot}(i,j) = |I_{n,o}(i,j) - I_{n,e}(i,j)|. \quad (2)$$

Реалізація цього дескриптора дає можливість досягати значного розмиття спеклів у межах ОІ через протилежні поздовжні зміщення ОІ під час запису n -го парного і непарного СЗ на резонансній частоті дефектів, розміщених під ОІ. Такі зміщення реєструють двома послідовними СЗ (парним і непарним) з двома некорельованими рухами спеклів, які завдяки сумуванню елементарних СЗ підвищують розмиття спеклів у межах ОІ. Оскільки ділянка поза межами ОІ не коливається чи коливається дуже слабо на резонансній частоті дефекту, різницеве СЗ $I_{n,\cdot}(i,j)$ містить ділянку розмитих спеклів в межах ОІ, яка відрізняється від решти площі більш високим рівнем інтенсивності або іншим рівнем контрасту. Ці відмінності спричинені не лише зміщеннями поверхні ОІ, але й геометричними параметрами оптичної системи та розмірами спеклів.

Щоб підвищити відношення просторового сигналу в межах ОІ до навколишнього фону, запропоновано сумувати всі отримані різниці СЗ. Тому результуючий накопичувальний диференціальний дескриптор динамічних спеклів можна подати таким виразом:

$$I \sum (i,j) = (\gamma N) - 1 \sum n [I_{n,\cdot}(i,j)], \quad (3)$$

де γ ($N-1 \leq \gamma \leq 1$) – коефіцієнт для вибору оптимального рівня інтенсивності результуючого СЗ $I \sum (i,j)$.

Для верифікації запропонованого методу було створено експериментальну установку гібридної оптико-електронної системи (ГОЕС), що містила Nd:YAG-лазер ($\lambda = 532$ нм, $P = 120$ мВт), цифрову камеру Sony-XCD-V60 із ПЗЗ-матрицею розмірністю 640×480 пікселів, об'єктив VEGA-7 (2/20) та угнуту лінзу, що розширює лазерний промінь і освітлює досліджувану ділянку. Зауважмо, що замість Nd:YAG-лазера може бути використаний довільний напівпровідниковий лазер. Часові

проміжки τ забезпечував АОД, що працював як швидкісний оптичний затвор. Час експозиції затвора був синхронізований з генерованою УЗ частотою і становив приблизно $T_{US}/4$. Така система має низку переваг у порівнянні з інтерферометричними системами, а саме:

- конструкція системи значно простіша: відсутній інтерферометр; простіший блок управління;
- мініатюрні дешеві лазерні діоди чи навіть вузькосмугові світлодіоди можуть бути використані замість висококогерентних лазерів;
- площа досліджуваної поверхні значно більша;
- декореляція спеклів не впливає на СЗ за порівняно великих нормальних зміщень поверхні. Система може реєструвати рух спеклів, якщо амплітуда коливань ОІ сягає десятків міліметрів;
- на основі розробленої ГОЕС можна створити прості і доступні системи неруйнівного контролю для дослідження багатшарових композитних панелей у виробничих умовах.

Схема розробленої ГОЕС показана на рис. 1.

Щоб покращити якість і підвищити контраст, над кінцевими СЗ, тобто над накопичувальними диференціальними дескрипторами спекл-зображень, виконують процедури цифрової обробки, що складається з наступних етапів:

- розмиття за Гауссом (4 піксели);
- обмеження рівня сигналу згори і знизу на 25 %, виходячи з гістограми;
- повторне розмиття за Гауссом обмеженого зображення (4 піксели);
- обмеження рівня сигналу згори і знизу, виходячи з гістограми;
- бінаризація на рівні близько 50 %.

Для моделювання підповерхневих дефектів у досліджуваній склопластиковій панелі, що містила скловолоконні шари і епоксидну сполучну речовину, було зроблено глухі отвори різного розміру. Отвори знаходилися на глибині 1 мм від поверхні спостереження, а товщина верхнього шару склопластику також становила 1 мм. Тов-

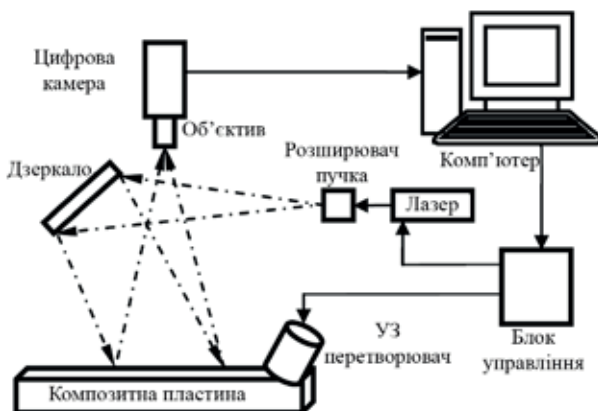


Рис. 1. Схема макету ГОЕС

щина панелі становила 6 мм. УЗ збудження панелі здійснювали в діапазоні від 15 до 150 кГц. Максимальне потовщення панелі в межах ОІ відповідало максимальному значенню гармонічної УЗ хвилі, а максимальне потоншення у тому самому місці – мінімальному значенню УЗ. Максимальне розмиття спеклів на певних ділянках ОІ досягали за максимального нахилу цих ділянок та високої швидкості їх переміщення протягом запису елементарного СЗ з часовим проміжком τ . З іншого боку, резонансні частоти практично не впливали на поверхню панелі поза межами ОІ.

На рис. 2 показаний макет ГОЕС, на якому виконували експерименти.

На рис. 3 показана панель, що містить круглі глухі отвори діаметрами 10 та 15 мм та квадратний глухий отвір зі стороною 22 мм. На рис. 4 наведено результати виявлення прихованих отворів у панелі.

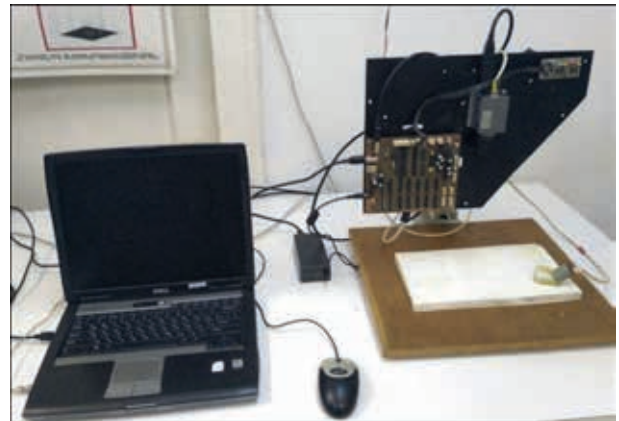


Рис. 2. Макет ГОЕС

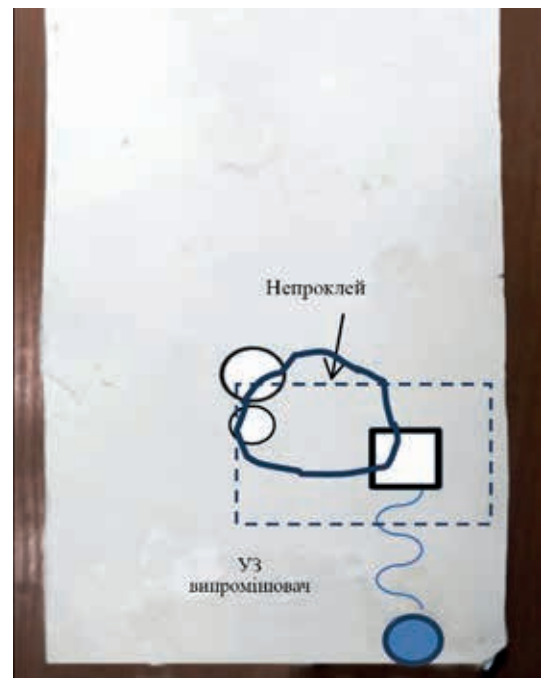


Рис. 3. Фібергласова (склопластиковая) панель, зображена з тильного боку з позначеними розташуваннями круглих і квадратних глухих отворів та області непоклею, а також УЗ випромінювача, розташованого зі зовнішнього боку панелі

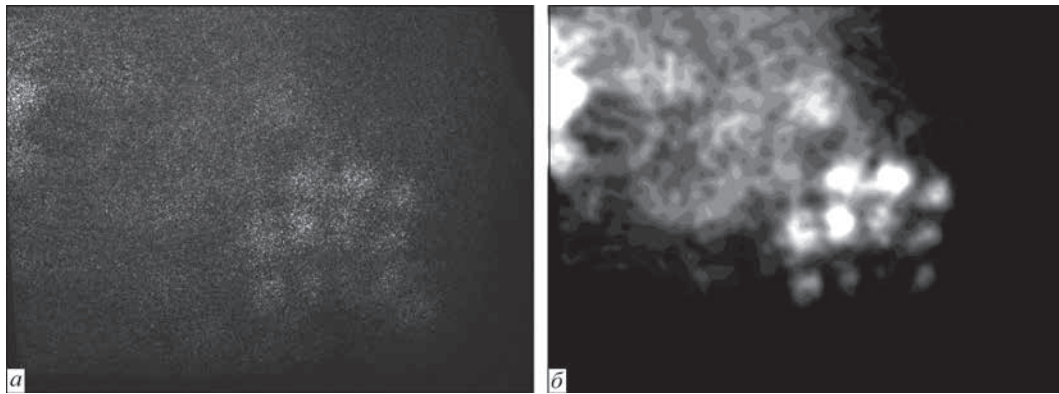


Рис. 4. Кумулятивне різницеве СЗ, $f_{r1} = 70$ кГц (а) та кумулятивне СЗ після процедури цифрової обробки (б)

В експерименті було зареєстровано 50 пар непарних і парних СЗ на резонансній частоті моди [3,3], рівній $f_{3,3} = 70$ кГц, часові інтервали $\tau = 3.8$ мкс, час затримки $\delta_t = 2,1$ мкс, $K = 24$. Аналіз отриманих експериментальних результатів підтверджує генерування гармонічних мод коливної ОІ УЗ збудженням. Зокрема, в межах квадратного отвору кількість виявлених градієнтів моди [3,3] становила 4×3 , що відповідає розподілу амплітуд градієнта такої моди. Як видно з рисунка, якість виділення меншого за розмірами круглого отвору при цій частоті істотно нижча. Наявність засвітки між обома отворами ймовірно пояснюється поганим проклеюванням шарів скловолокна, сприйнятим системою як дефект.

Розрахунково-експериментальна методика з визначення допустимих напружень змінання у багаторядних болтових з'єднаннях «композит-метал». Реальні болтові з'єднання «композит-метал» найчастіше мають десятки болтів, розміщених у декілька рядів. За припущення достатньої віддаленості болтів один від одного, максимальну несучу здатність такого з'єднання зі задовільною точністю можна визначати за міцністю змінання зразка з одиничним (ізолюваним) отвором. Тому такі випробування є базовими для оцінки міцності композиту у багаторядному з'єднанні [7, 8].

На міцність за змінання досліджували 12-шаровий вуглепластиковий композит типу ЕЛУР–

008П/БН зі схемою укладання арматури $\pm 45^\circ$. Плоскі зразки довжиною $L = 135$ мм, шириною $W = 30$ мм і товщиною $t = 3,4$ мм із каліброваним отвором діаметром $d = 6$ мм у робочій частині зразка виготовляли згідно з рекомендаціями ASTM D 5961/5961M–01. На захоплювальну частину зразка з двох боків наклеювали захисні текстолітові накладки завтовшки 1,5 мм (рис. 5).

Для однозначної оцінки допустимих напружень змінання в композиті необхідно встановити гранично допустиму деформацію матеріалу, у даному випадку – ступінь овалізації контактної отвору, яка для шаруватих полімерних композитних матеріалів не повинна перевищувати 2 % [9].

Зразок навантажували розтягом на універсальній розривній машині FP-100 через контактний елемент (КЕ) – сталевий болт діаметром $d = 6$ мм. Під час розтягу за швидкості переміщення траверси 1 мм/хв нерухомий КЕ деформував отвір. Для визначення деформацій у зоні контакту «композит-метал» використовували ЦКЗ та порівнювали спекл-зображення поверхні зразка у недеформованому стані і після навантаження [10]. За отриманими цифровими зображеннями розраховували поля переміщень та локальних деформацій на всіх етапах навантаження (рис. 6). Напруження змінання у болтовому з'єднанні композиту визначали за методикою [11, 12]. Побудували діа-

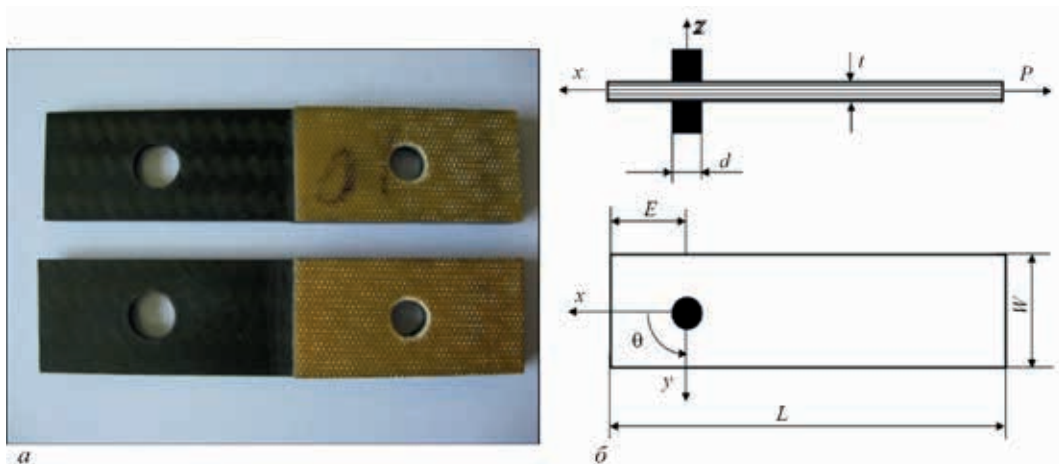


Рис. 5. Загальний вигляд (а) та схема експериментальних зразків (б)

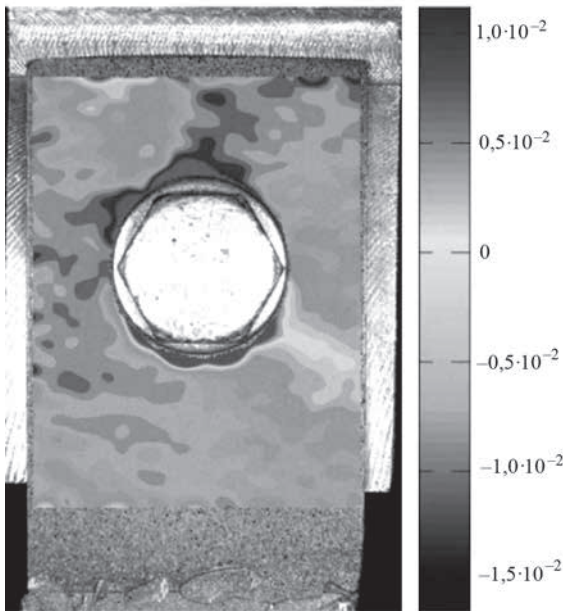


Рис. 6. Розподіл локальної деформації зразка ϵ_{yy} у зоні контакту, що відповідає овалізації 2 %

грами руйнування композитного зразка в координатах навантаження-овалізація отвору ($P-\delta$) та напруження-деформація ($\sigma-\epsilon_{yy}$) (рис. 7). Допустиме напруження змінання, що відповідає деформуванню контактного отвору на 2 %, обчислили за формулою

$$[\sigma_B] = \frac{P_{cr}}{d \cdot t}, \quad (4)$$

де P_{cr} – критичне зусилля змінання; d – діаметр отвору; t – товщина композитного зразка. Результати експериментальних досліджень наведені у таблиці 1.

Розроблену методику для одного з'єднання використали, щоб визначити допустимі напруження змінання у дворядному болтовому з'єднанні «композит-метал» [13]. Для цього виготовили партію зразків із такого ж матеріалу, що і зразки з одиничним отвором. Вони склалися із двох пластин вуглепластика ЕЛУР-008П/БН довжиною $L = 200$ мм, шириною $W = 100$ мм і товщиною $t = 3,4$ мм, з'єднаних двома рядами сталевих болтів М6 за допомогою плоскої дюралевої накладки товщиною 5 мм (рис. 8), що відповідає умовам роботи реальних конструкцій. Довжина робочої частини зразка $l = 160$ мм. Щоб попередити руйнування у клинових захопах розривної машини, на краї зразка наклеювали захисні склотекстолітові накладки завдовжки 120 мм. Для уникнення впли-

Таблиця 1. Результати експериментальних досліджень

Номер зразка	ϵ_{yy}	P_{cr} , N	$[\sigma_B]$, Pa
1	$2,01 \cdot 10^{-2}$	5100	250
2	$1,98 \cdot 10^{-2}$	5018	246
3	$2,02 \cdot 10^{-2}$	5385	264
4	$2,00 \cdot 10^{-2}$	5059	248
5	$2,03 \cdot 10^{-2}$	5610	275

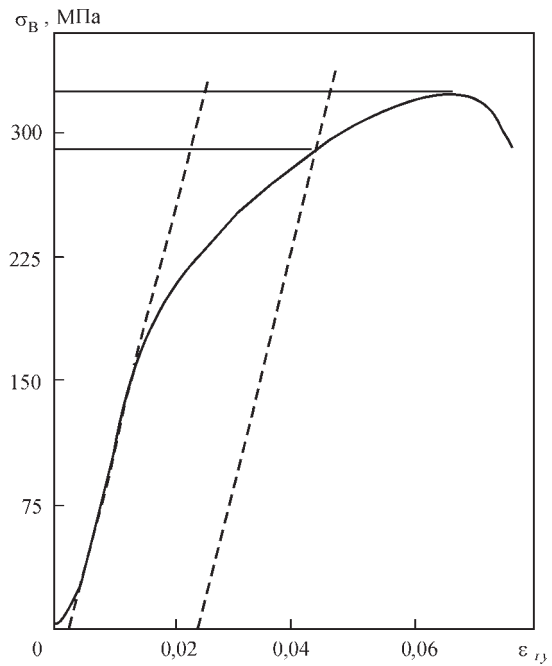


Рис. 7. Діаграма змінання одиничного болтового з'єднання «композит-метал»; ϵ – деформація контактного отвору 2 %

ву згинного моменту у місці з'єднання пластин ламінату під час розтягу зразка використовували захисні накладки різної товщини: 5 мм – від дюралевої пластини, а 1,6 мм – з протилежного боку. Під час експерименту зразок кріпили у клинових захопах розривної машини EUS-20 і розтягули зі швидкістю 1 мм/хв. За допомогою методу ЦКЗ отримали загальну картину розподілу деформацій в околі усіх болтів, які з'єднують дві пластини ламінату за різного навантаження (рис. 9). За шкалою на рис. 6, яка ідентична шкалі на рис. 9, визначали деформацію ϵ_{yy} у контактних точках зразка, а за діаграмою $\sigma-\epsilon_{yy}$ (рис. 7) для одиничного болтового з'єднання – напруження змінання σ_B (табл. 2).

Виявили (рис. 9), що ламінат в зоні контакту зі сталевими болтами деформується неоднаково. Причиною цього може бути нерівномірність затягування болтів та неспіввісність отворів у композитній та дюралевій пластинах. В околі болтових з'єднань 1b, 2b, 4b, 5b та 2a зафіксували більші деформації, тому тут максимально допустима

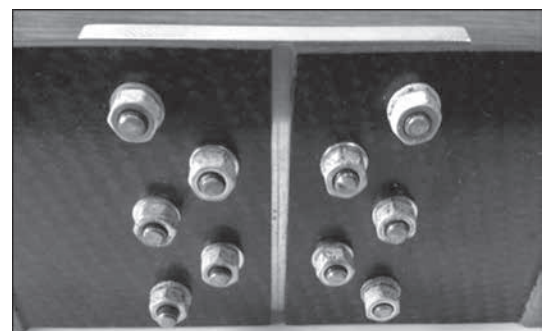


Рис. 8. Вигляд композитного зразка з дворядним болтовим з'єднанням

Таблиця 2. Деформації та напруження змінання дворяд-ного болтового з'єднання (зразок № 1)

Вузол з'єднання (див. рис. 9)	ϵ_{yy}	$[\sigma_B]$, МПа
1a	$0,61 \cdot 10^{-2}$	200
2a	$1,80 \cdot 10^{-2}$	225
3a	$0,51 \cdot 10^{-2}$	185
4a	$0,11 \cdot 10^{-2}$	105
5a	$0,50 \cdot 10^{-2}$	180
1b	$2,04 \cdot 10^{-2}$	246
2b	$2,10 \cdot 10^{-2}$	284
3b	$0,50 \cdot 10^{-2}$	190
4b	$2,00 \cdot 10^{-2}$	242
5b	$2,15 \cdot 10^{-2}$	290

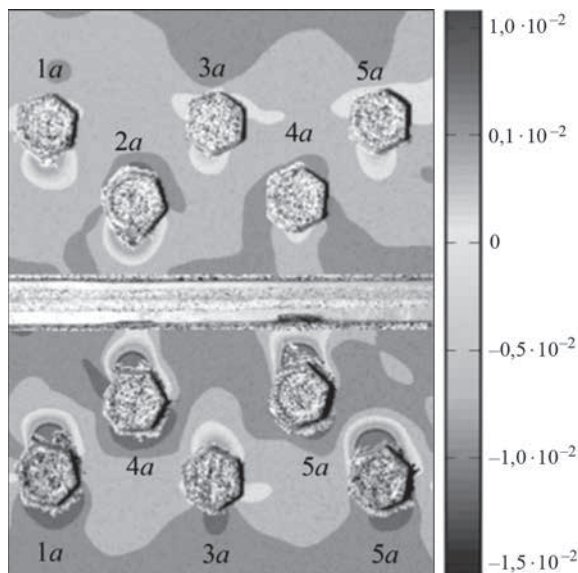


Рис. 9. Розподіл деформацій ϵ_{yy} на поверхні композитного зразка з укладанням арматури $\pm 45^\circ$ за максимального навантаження

овалізація отворів досягнута швидше. Порівнюючи розподіли деформацій біля контактних точок багаторядного болтового з'єднання і у зразку з одиничним контактом, виявили несуттєву їх відмінність, що зумовлено взаємним впливом деформацій близько розташованих болтів. Ці особливості необхідно враховувати, вибираючи геометрію розташування і відстань між рядами болтів під час проектування роз'ємних багаторядних болтових з'єднань. Зіставивши розподіли локальних деформацій у контактних зонах дворядного і одиничного болтових з'єднань, визначили максимально допустимі напруження змінання у реальних багаторядних з'єднаннях для ідентичних полімерних композитних матеріалів.

Висновки

Розроблено методику виявлення підповерхневих дефектів у багат шарових композитних панелях. Ця методика використовує відмінності у випадкових рухах («мерехтіннях») спеклів поверхні композиту, зокрема, в межах і поза межами ОІ під час УЗ збудження панелі. Створений макет ГОЕС

має просту конструкцію і в ньому відсутня складна інтерферометрична система для виявлення внутрішніх дефектів. Достовірність запропонованої методики підтверджена результатами експериментів з композитними панелями, що містили глухі отвори. Систему, збудована на базі макету ГОЕС, можна буде використовувати не лише в лабораторії, але також у виробничих умовах завдяки низькій чутливості до вібрацій і відсутності явища декореляції спеклів за великих амплітуд коливань ОІ.

Розроблено розрахунково-експериментальну методику з визначення допустимих напружень змінання у багаторядних болтових з'єднаннях «композит–метал» через їх порівняння з напруженнями, отриманими для стандартного композитного зразка з одним контактним елементом. Запропонований спосіб експериментально перевірено на зразках зі шаруватого вуглепластику типу ЕЛУР–008П/БН зі схемою укладання арматури $\pm 45^\circ$.

Список літератури

1. Муравський Л.І., Куць О.Г., Вороняк Т.І., Гаськевич Г.І., Коцюба Ю.М., Стасишин І.В. (2019) Спосіб виявлення внутрішніх дефектів у зразках конструкційних матеріалів та елементів конструкцій. України Пат. № 136987. Зареєстр. в Держреєстрі патентів України на корисні моделі 25.09.2019 р. Бюл. № 18.
2. Muravsky L., Kuts O., Gaskevych G., Suriadova O. (2019) Detection of subsurface defects in composite panels using dynamic speckle patterns. XIth Int. Sci. & Pract. Conf. Electronics & Inform. Technol. (ELIT), 7–10. #47280 Published in IEEE Xplore digital library effective 2019-11-11.
3. Briers D., Duncan D.D., Hirst E. et al. (2013) Laser speckle contrast imaging: theoretical and practical limitations. *J. Biomed. Opt.*, **18**, 066018.
4. Zdunek A., Muravsky L., Frankevych L., Konstantkiewicz K. (2007) New nondestructive method based on spatial-temporal speckle correlation technique for evaluation of apples quality during shelf-life. *Int. Agrophys.*, **21**, 305–310.
5. Maksymenko O.P., Muravsky L.I., Berezyuk M.I. (2015) Application of biospeckles for assessment of structural and cellular changes in muscle tissue. *J. Biomed. Opt.*, **20**(4), 095006-1-7.
6. Dai Pra A.L., Meschino G.J., Guzmán M.N. et al. (2016) Dynamic speckle image segmentation using self-organizing maps. *J. Opt.-UK*, **18**, 085606.
7. Киркач А.Б. (2011) Проблема прочности болтовых соединений на основе слоистых композиционных пластиков. *Вестник ХПИ. Сер. Динамика и прочность машин*, 45–54.
8. Карпов Я.С. (1998) Дослідження напружено-деформованого стану багаторядних механічних з'єднань деталей з композиційних матеріалів. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. Харків, Нац. аерокосм. ун-т ім. М.С. Жуковського «ХАІ», 328–334.
9. (2003) ASTM D 5961/5961M-01. Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates.
10. Гвоздюк М., Мольков Ю. (2014) Визначення міцнісних характеристик механічного з'єднання композит–метал. *Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій*. Панасюк В.В. (ред.). Львів, Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка НАН України, 517–522.
11. Максименко О.П., Іваницький Я.Л., Гвоздюк М.М. (2014) Визначення жорсткості з'єднання композит–метал методом цифрової кореляції зображень. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, **50**(6), 44–49.
12. Іваницький Я.Л., Максименко О.П., Гвоздюк М.М., Муравський Л.І., Мольков Ю.В. (2017) Спосіб визначення

жорсткості механічного з'єднання «композит–метал». Патент на корисну модель № 116508. Опубл. 25.05.2017. Бюлетень № 10.

13. Ivanytskyi Ya.L., Hvozdyuk M.M., Maksymenko O.P. et al. (2019) Evaluation of the strength of bolted joints of composite plates. *Materials Science*, 55(2), 265–271

References

1. Muravskiy, L.I., Kuts, O.G., Voronyak, T.I., Gaskevych, G.I., Kotsyuba, Yu.M., Stasyshyn, I.V. (2019) Method to detect internal defects in samples of structural materials and elements. *Ukraine Pat.* 136987, registered on utility model 25.09.2019 [in Ukrainian].
2. Muravsky, L., Kuts, O., Gaskevych, G., Suriadova, O. (2019) Detection of subsurface defects in composite panels using dynamic speckle patterns. In: 11th Int. Sci. & Pract. Conf. Electronics & Inform. Technol. (ELIT), 7–10, 47280, publish. in IEEE Xplore digital library effective 2019-11-11.
3. Briers, D., Duncan, D.D., Hirst, E. et al. (2013) Laser speckle contrast imaging: Theoretical and practical limitations. *J. Biomed. Opt.*, 18, 066018.
4. Zdunek, A., Muravsky, L., Frankevych, L., Konstankiewicz, K. (2007) New nondestructive method based on spatial-temporal speckle correlation technique for evaluation of apples quality during shelf-life. *Int. Agrophys.*, 21, 305–310.
5. Maksymenko, O.P., Muravsky, L.I., Berezyuk, M.I. (2015) Application of biospeckles for assessment of structural and cellular changes in muscle tissue. *J. Biomed. Opt.*, 20(4), 095006-1-7.

6. Dai Pra, A.L., Meschino, G.J., Guzmán, M.N. et al. (2016) Dynamic speckle image segmentation using self-organizing maps. *J. Opt.-UK*, 18, 085606.
7. Kirkach, A.B. Problem of strength of bolted joints based on laminated composite plastics. *Vestnik KhPI. Ser. Dinamika i Prochnost Mashin*, 45–54 [in Russian].
8. Karpov, Ya.S. (1998) Investigations of stress-strain state of multirow mechanical connections of the parts from composite materials. In: *Aerospace engineering and technology*, 328–334. Kharkiv, KhAI [in Ukrainian].
9. (2003) ASTM D 5961/5961M-01. Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates.
10. Gvozdyuk, M., Molkov, Yu. (2014) Determination of strength characteristics of composite-metal mechanical connection. In: *Fracture mechanics of materials and strength of structures*. Ed. by V.V. Panasyuk. Lviv, PMI, 517–522 [in Ukrainian].
11. Maksymenko, O.P., Ivanytskyi, Ya.L., Gvozdyuk, M.M. (2014) Determination of rigidity of composite-metal joint by the method of digital correlation of images. *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, 50(6), 44–49 [in Ukrainian].
12. Ivanytskyi, Ya.L., Maksymenko, O.P., Gvozdyuk, M.M., Muravskiy, L.I., Molkov, Yu.V. (2017) Method to determine the rigidity of composite-metal mechanical connection. Pat. on utility model 116508, publish. 25.05.2017 [in Ukrainian].
13. Ivanytskyi, Ya.L., Hvozdyuk M.M., Maksymenko O.P. et al. (2019) Evaluation of the strength of bolted joints of composite plates. *Materials Sci.*, 55(2), 265–271.

NEW PROCEDURES AND TECHNICAL MEANS OF CONTROL AND EXTENSION OF SERVICE LIFE OF METAL-COMPOSITE JOINTS OF AVIATION EQUIPMENT

L.I. Muravskiy, T.I. Voronyak, Ya.L. Ivanytski, M.M. Gvozdyuk, O.P. Maksymenko, O.G. Kuts, I.V. Stasyshyn, G.I. Gaskevych, O.D. Suriadova

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

A procedure was developed for detection of subsurface defects in layered composite structures by tracing dynamic changes of optical speckles on surface images directly above the defect under the impact of resonance ultrasonic excitation, as well as a procedure for determination of deformation fields near loaded holes in composites for different modes of their drilling, using a portable optico-digital correlator. The paper gives the results of investigations on determination of crushing stresses in multirow «composite-metal» bolted joints by deformation in the vicinity of an isolated hole, contact-loaded through a bolt. 13 Ref., 2 Tabl., 9 Fig.

Keywords: subsurface defects, composite panel, metal-composite joints, speckle-images, dynamic speckles, ultrasonic excitation, hole elongation, digital correlation of images, crushing stresses, bolted joints, deformation field

Надійшла до редакції 08.07.2020

НОВА КНИГА

Збірка тез конференції «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану»



Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану: Тези допов. міжнар. конф. під ред. Ю.М. Посипайка / Київ: Міжнародна Асоціація «Зварювання», 2020. — 74 стор.

В збірці представлено 40 тез доповідей XXIII міжнародної конференції «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану» (14–18 вересня 2020 р., м. Одеса), в яких відображені останні досягнення та практичні результати в галузі неруйнівного контролю та технічної діагностики.

Збірку можна замовити в редакції журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль»

www.patonpublishinghouse.com