

УДК 620.174.22;528.854

## ВИЗНАЧЕННЯ ЖОРСТКОСТІ З'ЄДНАННЯ “КОМПОЗИТ–МЕТАЛ” МЕТОДОМ ЦИФРОВОЇ КОРЕЛЯЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ

О. П. МАКСИМЕНКО, Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ, М. М. ГВОЗДЮК

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

На основі методу цифрової кореляційної обробки зображень розроблено спосіб визначення жорсткості механічних з'єднань шаруватих вуглепластиків, який враховує неоднорідність розподілу деформацій на поверхні композитного зразка. Описано методику вимірювань, алгоритм обробки зображень та наведено експериментальні результати.

**Ключові слова:** жорсткість з'єднання, цифрова кореляція зображень, розподіл переміщень і деформацій, обробка зображень.

Полімерні композиційні матеріали (ПКМ) широкого використовують у різних галузях промисловості. Тому виникає проблема надійного їх з'єднання з металевими конструкціями. Через невисоку опірність ПКМ змінанню змінюються геометричні розміри технологічних отворів болтових і заклепкових з'єднань, а отже, порушується їх жорсткість. Це призводить до зменшення майже удвічі міцності конструкцій порівняно зі суцільним матеріалом [1].

Складність оцінювання міцності і жорсткості механічного з'єднання “композит–метал” зумовлена просторовою анізотропією механічних характеристик шаруватих ПКМ. Стандартні методи їх випробувань на зминання [2, 3] ґрунтуються на лінійній теорії деформацій однорідного суцільного тіла і дають неоднозначні експериментальні результати. Аналіз [4, 5] механізмів зминання виявив, що під час деформування у локальному об'ємі зразка виникає складний напружено-деформований стан з областями стиску, розтягу та зсуву. Тому, проектуючи такі з'єднання, важливо вибрати їх конструкцію та визначити допустимі напруження зминання композиційних матеріалів.

Стандартні методи передбачають вимірювання переміщень і деформацій у зоні зминання за допомогою механічних контактних перетворювачів. Найпридатнішим для розташування опорної точки є місце, де деформації робочої частини зразка відсутні або мінімальні. В іншому випадку деформації розтягу додаватимуться до істинних деформацій отвору. До недоліків контактних перетворювачів слід віднести дискретність вимірювання деформації у встановлених місцях та чутливість до повороту і згину зразка. Оскільки існують різні схеми армування шаруватих ПКМ, для встановлення положення опорних точок на поверхні зразка важливо мати інформацію про повний просторовий розподіл деформацій, за яким можна оцінити механізм руйнування на всіх стадіях навантаження і встановити дійсні деформації отвору.

**Оптичні методи визначення просторових розподілів деформацій під час зминання.** Для дослідження процесів зминання, зокрема у зразках із шаруватих композитів (AS4/3501-6), виготовлених на основі епоксидної матриці і волокон графітну зі схемою армування ( $0^\circ/\pm 60^\circ$ ), найчастіше застосовують метод муарової інтерферометрії [6]. За ним формують дві ґратки, одну з яких 1200 lin./mm на-

носять на поверхню зразка, а іншу, опорну, 2400 lin./mm проєктують на зразок і отримують просторовий розподіл переміщень його поверхні з розділенням  $0,4 \mu\text{m}$  на смугу, за якими методом скінченних елементів розраховують розподіл напружень. Подібно досліджували [7] деформації чотири- і дванадцятишарових ПКМ із різними схемами армування.

Для побудови полів деформацій за змінання вжито [8] метод двопрменевої спекл-інтерферометрії зі чотириступеневим зсувом фази в одному з променів на заданий кут. Тут результуюче поле переміщень отримали з дискретністю  $\lambda/256$  ( $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання лазера).

Оптичні методи муарової і спекл-інтерферометрії забезпечують високу чутливість і точність визначення просторових переміщень і деформацій поверхні в околі навантаженого отвору. Проте потребують дорогого прецизійного оптичного обладнання, а також чутливі до вібрацій та паразитних зсувів зразка, що ускладнює їх застосування в умовах експлуатації. Крім того, обробку зображень, отриманих за їх допомогою, складно повністю автоматизувати. Для спрощення оптичної схеми вимірювання, збільшення кроку навантаження, забезпечення автоматизації вимірювань і коректного розрахунку характеристик змінання ПКМ запропоновано метод цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) [9].

**Зразки, обладнання та методика.** Для визначення міцності і жорсткості механічного з'єднання “композит–метал” на основі методу ЦКЗ випробовували на змінання шість зразків із шаруватого вуглепластику ЕЛУР-008П/БН зі схемою армування ( $\pm 45^\circ$ ). Плоскі зразки із захисними накладками шириною  $W = 30,0 \text{ mm}$ , товщиною  $t = 1,8 \text{ mm}$  і діаметром отвору  $D = 10,0 \text{ mm}$  (рис. 1а) виготовили згідно з рекомендаціями ASTM D 5961/5961M-01. Схема навантаження подана на рис. 1б.

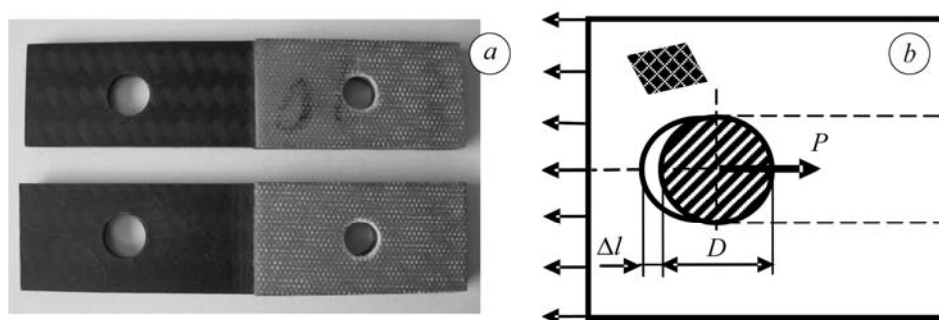


Рис. 1. Зразки (а) та схема їх навантаження (б).

Fig. 1. Samples (a) and scheme of their circuit loading (b).

Щоб отримати зображення, придатні для крос-кореляційної обробки за методом ЦКЗ, на робочій поверхні зразка формували штучні спекли, розпилюючи невелику кількість білої фарби. Зразок фіксували у нижніх рухомих захоплювачах універсальної розривної машини FP-100, а його протилежний кінець заводили в паз рамної конструкції навантажувального пристрою, закріпленого у верхніх нерухомих захоплювачах. В отвір зразка вставляли контактний елемент (КЕ) у вигляді сталевого стрижня діаметром  $D = 10 \text{ mm}$ , вільні кінці якого опиралися на горизонтальну балку рами. Навантажували розтягом зі швидкістю  $1 \text{ mm/min}$ , в результаті чого нерухомий КЕ зминав край отвору. Під час експерименту періодично, з інтервалом  $\sim 4\text{s}$ , реєстрували зображення поверхні в околі зони контакту. За результатами випробувань будували діаграму руйнування в координатах  $P-\Delta l$

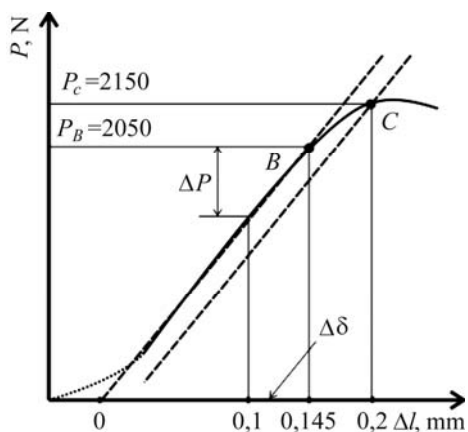


Рис. 2. Типова діаграма зминання.

Fig. 2. Typical crumpling curve.

на лінійній ділянці діаграми руйнування до точки  $B$ , і далі – до точки  $C$  обробляли за алгоритмом ЦКЗ, описаним раніше [9]. В алгоритм і програму обробки зображень вносили зміни, щоб врахувати умови навантаження та вплив краю отвору. Зображення, одержані за різного навантаження, обробляли попарною крос-кореляцією фрагментів  $F$  певних розмірів [10], які формуються із зареєстрованих зображень з перекриттям до  $1/4$  їх площі, що дає змогу деталізувати структуру полів переміщень і деформацій.

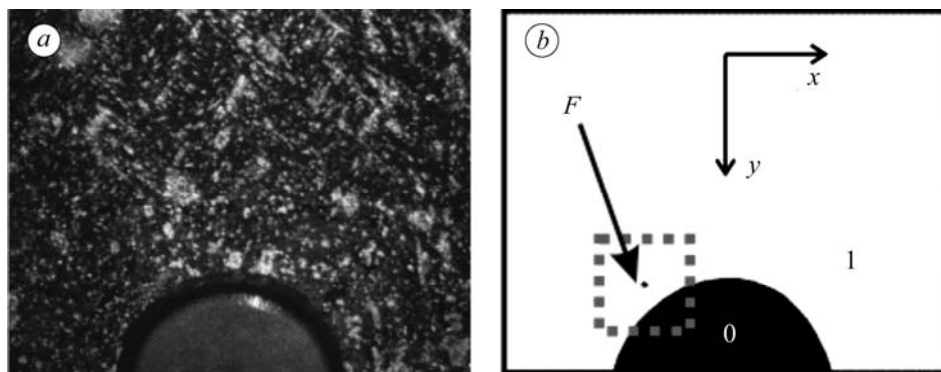


Рис. 3. Зображення поверхні зразка (a) та бінарна маска (b).

Fig. 3. Image the sample surface (a) and the binary mask (b).

Модифікація алгоритму полягала у створенні спеціальної бінарної маски, де кожному пікселю зображення поверхні зразка присвоювали значення 1, а отвору – 0 (рис. 3b). Маску використовували для корекції результату крос-кореляції фрагментів біля краю отвору. Якщо центр фрагмента попадав на піксель маски зі значенням 0, крос-кореляцію не виконували. За такого підходу можна гарантувати, що площа фрагменту під час крос-кореляції на краю отвору не зменшиться більше ніж на половину його площі, тому отримані там розподіли деформацій будуть достовірні. Використовуючи модифікований алгоритм ЦКЗ, побудували розподіли переміщень і деформацій поверхні зразка № 1 на лінійній ділянці діаграми навантаження, коли  $\Delta l$  змінюється в межах від 1 до 1,5%, а  $\Delta P = 1,2$  kN (рис. 4). На осях відкладено розміри області вимірювання в міліметрах, а ізолінії відтворюють розподіли деформацій і переміщень поверхні зразка у мікронах. За розподілами деформацій з обох боків отвору ближче до країв зразка виявили дві

(рис. 2), де точкою  $B$  позначено початок зминання, а точка  $C$  відповідає 2%-ій деформації отвору,  $\Delta l = 0,2$  mm. Паралельно записували діаграму зминання за стандартною методикою [2]. Для цього на протилежному боці зразка спеціальними ножами-упорами, один з яких приклеєний до площини його верхнього краю, а інший – до нерухомого КЕ, встановлювали двоконсольний тензOMETричний давач переміщення.

**Алгоритм ЦКЗ для побудови полів деформацій поверхні зразка під час зминання.** Для визначення деформацій у зоні контакту зразків отримані за допомогою відеокамери PL-661A зображення їх робочої поверхні (рис. 3a)

ділянки  $I$  і  $I'$ , де вони мінімальні. Переміщення поверхні зразка відносно нерухомого КЕ тут пропорційні зміні розмірів отвору. Цей висновок базується на аналізі розподілів переміщень  $\Delta u$  поверхні зразка № 2 на різних відстанях до навантаженої зони біля отвору (рис. 5), отриманих під час експерименту.

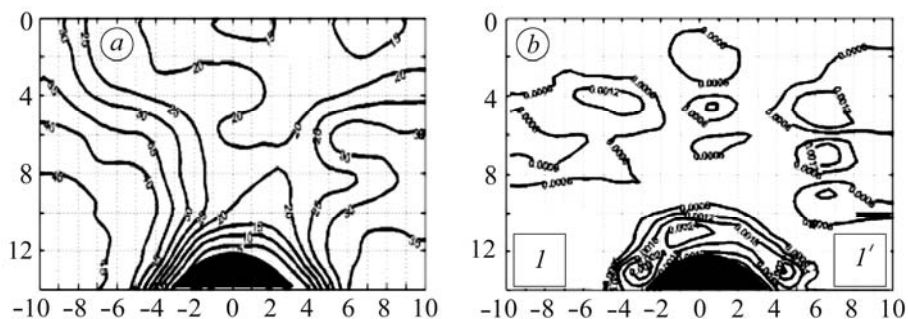


Рис. 4. Розподіл переміщень (a) та деформацій (b) поверхні зразка біля отвору.

Fig. 4. Distribution of displacements (a) and deformations (b) of the specimen surface at the hole.

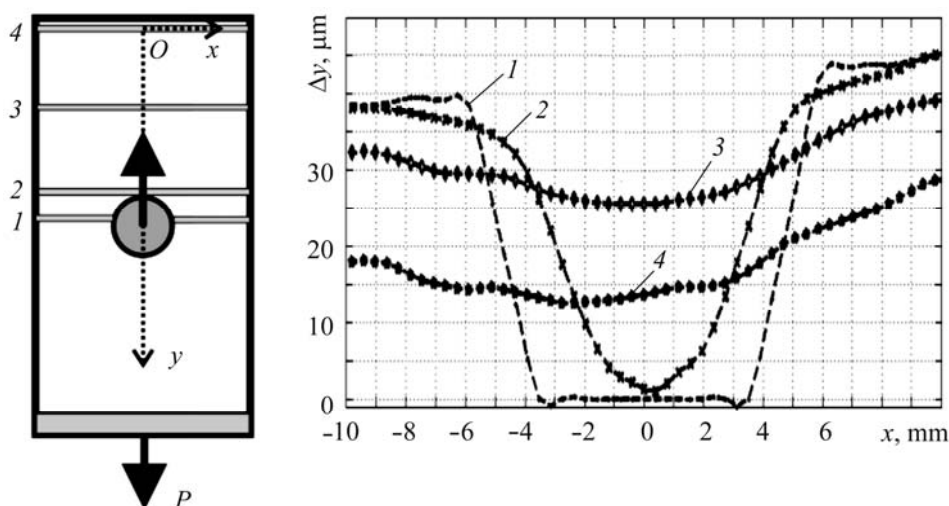


Рис. 5. Розподіл переміщень поверхні зразка на різних відстанях (криві 1–4) від зони контакту при  $\Delta P = 1$  kN.

Fig. 5. Distribution of displacements of the specimen surface at different distances (curves 1–4) from the contact area for  $\Delta P = 1$  kN.

Як бачимо (рис. 5, крива 3;  $y = 15$  mm або 4;  $y = 0$  mm), на лінійній частині діаграми  $P-\Delta l$  (див. рис. 2) маємо занижені значення переміщень і, відповідно, деформацій отвору, що призводить до завищеної оцінки жорсткості з'єднання. Переміщення (крива 2;  $y = 20$  mm) також зменшуються у напрямку вертикальної осі зразка, що спричиняє ще більшу переоцінку жорсткості з'єднання під час встановлення ножів-упорів вздовж осі  $Oy$ . Така переоцінка зумовлена впливом деформацій розтягу, за винятком невеликої зони біля краю зразка (крива 1;  $y = 29$  mm). Отже, на переміщення в областях  $I$  і  $I'$  (див. рис. 4) не впливають деформації зразка, тому їх можна використовувати, щоб визначити деформації отвору і коректно розрахувати жорсткість з'єднання.

**Розрахунок міцності і жорсткості з'єднання за полями переміщень.** Жорсткість розраховували за відношенням зміни напружень і деформацій отвору на лінійній ділянці діаграми [2]:

$$E = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon \quad , \quad (1)$$

де  $\Delta\sigma$  і  $\Delta\varepsilon$  – зміни напруження і деформацій отвору.

На відміну від відомих методик випробувань на зминання, де деформації отвору визначають за допомогою механічних індикаторів, використали безконтактний метод ЦКЗ для вимірювання переміщення поверхні зразка в областях  $I$  і  $I'$  відносно КЕ:

$$\Delta\varepsilon = \frac{(\Delta\delta_1 + \Delta\delta_2)/2}{D} \quad , \quad (2)$$

де  $\Delta\delta_1$  і  $\Delta\delta_2$  – середні переміщення поверхні зразка в областях  $I$  і  $I'$  (див. рис. 4);  $D$  – діаметр КЕ. Зміну напружень під час експерименту розраховували так:

$$\Delta\sigma = \Delta P / Dt \quad , \quad (3)$$

де  $\Delta P$  – приріст навантаження до моменту зминання;  $t$  – товщина зразка.

Обчислена за виразом (1) з використанням співвідношень (2) і (3) жорсткість з'єднання на лінійній ділянці до точки  $B$  ( $E_B$ ) і на відрізку  $BC$  ( $E_{0,02}$ ), коли овалізація отвору досягає 2% (див. рис. 2), максимальні напруження  $\sigma_B$  і  $\sigma_B^*$ , визначені ЦКЗ та стандартним методами, подані у таблиці.

#### Результати розрахунку жорсткості механічного з'єднання

№ зразка	$\Delta\delta_1$	$\Delta\delta_2$	$\Delta\varepsilon$	$\Delta P$ , N	$\Delta\sigma$	$\sigma_B$	$\sigma_B^*$	$E_B$	$E_{0,02}$
	μm								
1	45	35	0,0040	1219	62,71	169,98	172,25	16,95	1,14
2	40	45	0,0042	1090	60,55	150,55	156,30	14,98	1,06
3	48	50	0,0049	1250	69,44	170,33	173,00	14,17	1,08
4	41	38	0,0040	1105	61,39	165,78	168,50	15,35	1,10
5	39	46	0,0043	1150	63,89	168,54	170,80	14,86	1,09

Напруження зминання  $\sigma_B$  за максимального навантаження  $P_B$  визначали за формулою

$$\sigma_B = P_B / Dt \quad . \quad (4)$$

Як бачимо, напруження зминання  $\sigma_B^*$ , визначені за стандартною методикою, добре корелюють із отриманими методом ЦКЗ.

#### ВИСНОВКИ

Розроблено розрахунково-експериментальний спосіб визначення жорсткості механічного з'єднання “композит–метал” з використанням цифрової кореляційної обробки зображень поверхні зразків за зминання. За отриманими експериментально розподілами деформацій для шаруватого вуглепластику в зоні контакту “композит–метал” методом ЦКЗ виявлено на поверхні зразка області відліку для вимірювання дійсних деформацій зминання отвору, необхідних для коректного розрахунку жорсткості з'єднання.

*РЕЗЮМЕ.* На основе метода цифровой корреляции изображений разработан способ определения жесткости механического соединения слоистых композитов, который учитывает неоднородность распределения деформаций на поверхности образца. Описана мето-

дика измерений, алгоритм обработки изображений и приведены экспериментальные результаты.

*SUMMARY.* On the basis of digital image correlation (DIC) technique a method of determining the rigidity of the mechanical joint of layered composites with account of heterogeneity of strain distribution on the specimen surface is developed. The method of measurements, image processing algorithm are described and experimental results are presented.

1. *Handbook of composites* / Ed. S. T. Peters. – London: Chapman & Hall, 1998. – 1118 p.
2. *D 5961/D 5961M – 01*. Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates.
3. *D953–02*. Standard Test Method for Bearing Strength of Plastics.
4. *Еврасов В. С., Нужный Г. А.* Определение характеристик смятия при механических испытаниях // Все материалы: Энциклоп. справ. – 2012. – № 1. – С. 14–21.
5. *Vangrimde B. and Boukhili R.* Analysis of the bearing response test for polymer matrix composite laminates: bearing stiffness measurement and simulation // *Comp. Struct.* – 2002. – **56**. – P. 359–374.
6. *Tsai M. Y. and Morton J.* Stress and Failure Analysis of a Pin-Loaded Composite Plate: An Experimental Study // *J. of Comp. Mat.* – 1990. – **24**. – P. 1101–1120.
7. *Koshide S.* Investigation of the Pin Joints in Composites by the Moire Method // *Exp. Mech.* – 1986. – **26**, № 2. – P. 113–118.
8. *Scalea F. L, Hong S. S., and Cloud G. L.* Whole-field Strain Measurement in a Pin-loaded Plate by Electronic Speckle Pattern Interferometry and the Finite Element Method // *Exp. Mech.* – 1998. – **38**, № 1. – P. 55–60.
9. *Максименко О., Франкевич Л., Сахарук О.* Алгоритм обробки цифрових зображень для визначення деформаційних характеристик матеріалів // *Електроніка та інформ. технології.* – 2013. – Вип. 3. – С. 156–168.
10. *Максименко О. П.* Оцінювання похибок визначення положення піка крос-кореляції за вхідними зображеннями // *Відбір і обробка інформації.* – 2013. – Вип. 39 (115). – С. 46–54.

*Одержано 27.05.2014*