

УДК 669.017.539.6

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМУВАННЯ ТА РУЙНУВАННЯ КОМПОЗИТІВ ЗАСОБАМИ ЕЛЕКТРОННОЇ СПЕКЛ-ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

Т. І. ВОРОНЯК¹, Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ¹, Л. І. МУРАВСЬКИЙ¹,
О. І. СЕМЕНЕЦЬ²

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² ДП "АНТОНОВ", Київ

Розроблено методику експериментальних досліджень деформування та руйнування зразків вуглепластикових композитів. Наведено схему експериментальної установки та проаналізовано результати досліджень. Показано ефективність методу електронної спекл-інтерферометрії для виявлення дефектів у вуглепластикових композитах, а також для оцінювання їх критичного напружено-деформованого стану.

Ключові слова: композитні матеріали, електронна спекл-інтерферометрія, деформування зразків.

Новітні технології, що використовуються у сучасному промисловому виробництві, вимагають розвитку високопродуктивних експериментальних засобів для діагностики та контролю нових конструкційних матеріалів. Серед сучасних і перспективних конструкційних матеріалів особливо важливу роль у машинобудуванні і, зокрема, у авіа- та автомобілебудуванні, відіграють композити. Перевагами конструкцій із композитних матеріалів є мала питома вага за високої міцності та жорсткості, низька теплопровідність, стійкість до впливу агресивних середовищ тощо. Визначення міцнісних характеристик таких композиційних матеріалів, зокрема шаруватих композитів, ускладнене значною анізотропією, яка пов'язана із неоднорідністю структури. Сучасні технології виготовлення композитів не забезпечують їх однорідності та бездефектності. Тому задача своєчасного виявлення та аналізу дефектів для запобігання руйнуванню конструкції або прогнозування її залишкового ресурсу методами неруйнівного контролю надзвичайно актуальна. Розвиток сучасних методів візуалізації полів деформацій та напружень дає змогу на якісно новому рівні ставити питання про діагностику матеріалів та їх з'єднань. Серед таких перспективних напрямів технічної діагностики є інформаційні технології спекл-метрології, де метод електронної спекл-інтерферометрії (ЕСІ) один з найефективніших [1–4].

Експериментальна установка та методика досліджень. Щоб дослідити деформування та руйнування зразків конструкційних композитних матеріалів, розробили установку, яка поєднувала електронний спекл-інтерферометр та навантажувальну машину. Для побудови спекл-інтерферометра вибрали схему Тваймана–Гріна, що обумовлено результатами попередніх експериментальних досліджень балкових і листових зразків конструкційних матеріалів, за якими встановлено, що спекл-інтерферометри, чутливі саме до позовжніх (нормальних) переміщень, дають змогу виявляти та ідентифікувати дефекти під час деформування зразків, визначати місце розташування дефектів та їх розміри, прослідкувати за їх виникненням і розвитком [4–6].

Установка статичного навантаження зразків розтягом встановлювалась безпосередньо біля інтерференційного стола СИН-1, на якому був змонтований спекл-інтерферометр. Принципова схема розтягу зразка в напрямку осі y зусиллям F наведена на рис. 1а, а схема навантажувальної машини – на рис. 1б.

Об'єктами досліджень були зразки з вуглепластикових композитів – шаруваті (до 12 шарів) та з хаотично армованими волокнами. Ділянку спостереження площею $30 \times 40 \text{ mm}^2$ вибирали в околі концентратора напружень у вигляді отвору (рис. 1) по середині зразка $\varnothing 3 \text{ mm}$ для шаруватих зразків та $\varnothing 5 \text{ mm}$ для зразків з хаотично армованими волокнами. На ці ділянки поверхонь зразків наносили тонкий шар дрібнодисперсної алюмінієвої фарби, що дало змогу підвищити коефіцієнт відбивання світла, забезпечити його рівномірність та отримати картини різницевих спекл-інтерферограм зі задовільним контрастом.

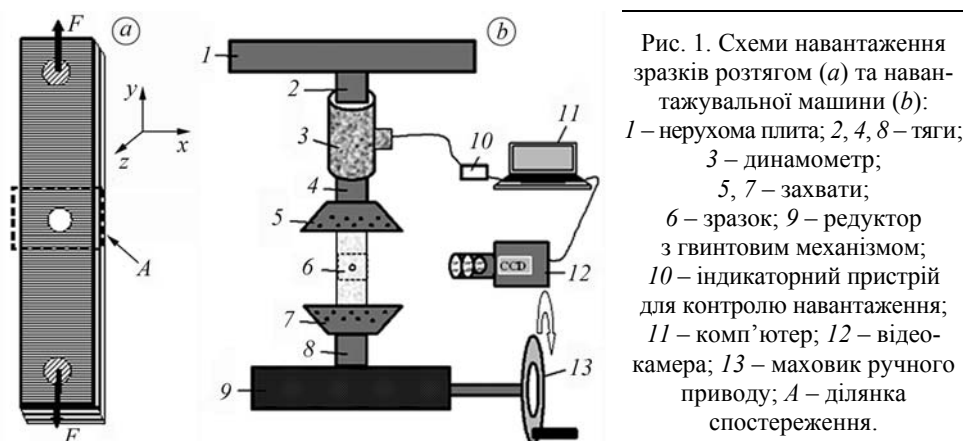


Рис. 1. Схеми навантаження зразків розтягом (а) та навантажувальної машини (б): 1 – нерухома плита; 2, 4, 8 – тяги; 3 – динамометр; 5, 7 – захвати; 6 – зразок; 9 – редуктор з гвинтовим механізмом; 10 – індикаторний пристрій для контролю навантаження; 11 – комп'ютер; 12 – відеокамера; 13 – маховик ручного приводу; А – ділянка спостереження.

Fig. 1. Scheme of specimen loading by tension (a) and a chart of the loading machine (b): 1 – immobile plate; 2, 4, 8 – tractions; 3 – dynamometer; 5, 7 – gripping appliances; 6 – specimen; 9 – reductor with screw mechanism; 10 – indicating device for loading value control; 11 – computer; 12 – video camera; 13 – handwheel; A – observation area.

Результати досліджень та їх обговорення. Різницеві смуги (рис. 2) – результат переміщення поверхні зразка вздовж нормалі до неї під дією прикладеного навантаження. Для кожної картини зразок спочатку покроково навантажували до заданої величини (попереднє навантаження – конкретна точка на діаграмі розтягу (рис.3)) і реєстрували спекл-інтерферограму (СІ) його поверхні. Після цього збільшували навантаження (для зразка з шаруватого композита не більше ніж 600 N) і знову реєстрували СІ поверхні. Далі ці СІ порівнювали (шляхом віднімання), щоб отримати картини різницевих смуг (різницевих СІ). Відомо, що кожна смуга на різницевій СІ відповідає геометричному місцю точок (пікселів) однакового переміщення поверхні вздовж нормалі, причому між сусідніми смугами різниця в переміщенні поверхні становить $\lambda/2$ або $0,3164 \mu\text{m}$ (λ – довжина хвилі лазерного випромінювання).

Під час навантаження зразка до 8 000 N картина різницевих смуг була однорідна (однорідним було і поле переміщень чи деформацій поверхні на ділянці спостереження), причому вплив концентратора на смуги відсутній (рис. 2а). Зі збільшенням навантаження картина смуг змінилася: смуги викривилися в околі концентратора напружень. Це викривлення зростало зі збільшенням навантаження. Конфігурацію смуг на різницевій СІ за навантаження, близького до критичного (для цього зразка 13 000 N), наведено на рис. 2б. Діаграми “напруження σ_y – деформація ε_y ” для двох матеріалів показані на рис. 3. На них відмічено характерні точки, які вказують на зміну залежності σ – ε , а також зміну густини смуг. Смуги

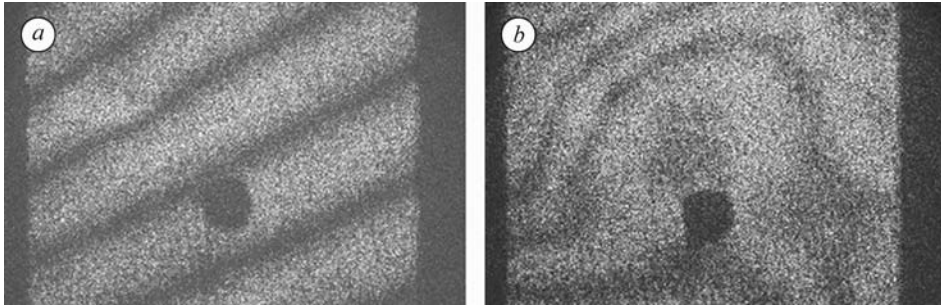


Рис. 2. Різницьві спекл-інтерферограми шаруватого композитного зразка, який навантажували розтягом 8 000 N (a) і 13 000 N (b).

Fig. 2. Difference speckle-interferograms of a layered composite specimen for values of tension loading: 8 000 N (a) and 13 000 N (b).

у вигляді кільця свідчать про випучування або западини на поверхні зразка, що, в свою чергу, може бути викликане розшаруванням композитного матеріалу. Таке припущення підтвердилось після того, як зразок у місці зміни геометрії поверхні та густини смуг розрізали ще до повного руйнування. Наведено зображення (рис. 4) місця розшарування зразка (світла еліпсоподібна пляма). Отже, за результатами експериментальних досліджень можна зробити висновок, що руйнуванню шаруватого композита передуює його розшарування, яке можна встановити методом ЕСІ.

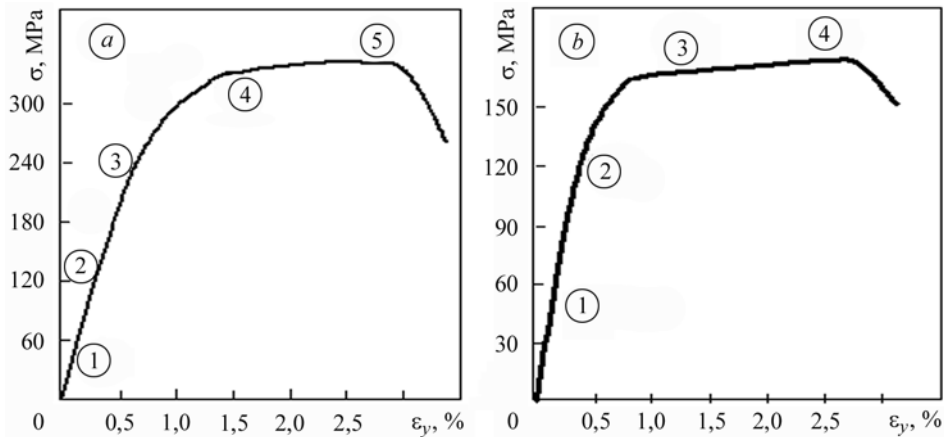
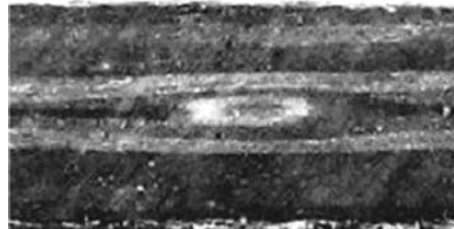


Рис. 3. Діаграми розтягу зразків багатшарового (a) і хаотично армованого (b) композита. 1–5 – точки, які вказують на залежність σ – ϵ та зміну густини смуг.

Fig. 3. Tensile test diagram for a multilayered (a) and chaotically reinforced composite (b) specimens. 1–5 – points indicating dependence σ – ϵ and fringe density change.

Рис. 4. Поперечний переріз зразка у місці розшарування.

Fig. 4. Transversal cross-section of the specimen in a layering area.



Вуглепластиковий хаотично армований композитний зразок навантажували розтягом аж до його руйнування. Показані (рис. 5) різницьві СІ за різних навантажень (точки на діаграмі розтягу, рис. 3b) Для цього зразка покрокове наванта-

ження не перевищувало 300 N. За навантаження до 6 000 N різниці смуги однорідні (рис. 5a) і вплив концентратора напружень відсутній. За більших навантажень смуги викривлялися в околі концентратора напружень. Це викривлення зростало зі збільшенням навантаження і найбільшу густину смуг (тобто поперечну деформацію зразка) спостерігали в околі концентратора напружень (рис. 5b, c). За навантаження 13 600 N зразок зруйнувався (рис. 5d).

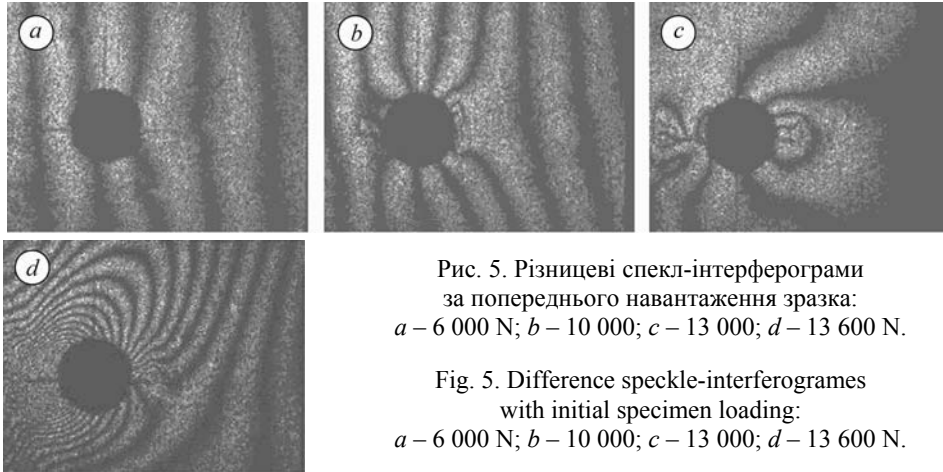


Рис. 5. Різниці спекл-інтерферограми за попереднього навантаження зразка: a – 6 000 N; b – 10 000; c – 13 000; d – 13 600 N.

Fig. 5. Difference speckle-interferograms with initial specimen loading: a – 6 000 N; b – 10 000; c – 13 000; d – 13 600 N.

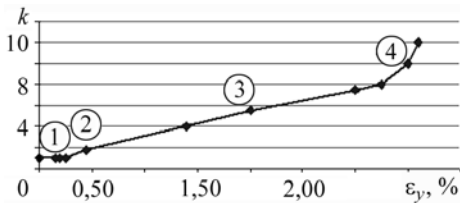


Рис. 6. Залежність відносної локальної густини смуг (k) від загальної деформації зразка (ϵ_y): 1–4 – точки на діаграмі розтягу (див. рис. 3b).

Fig. 6. Dependence of relative local fringe density (k) vs. general deformation along the specimen (ϵ_y): 1–4 – points on the stress-strain curve (see Fig. 3b).

зразок руйнувався в цьому місці (рис. 5d). Тому кількісний показник нормованої локальної густини цих смуг може свідчити про момент утворення дефекту та руйнування композита. Його можна характеризувати коефіцієнтом k відносної локальної густини смуг $k = N_{pz} / N_{ez}$, де N_{pz} та N_{ez} – густина смуг зони пластично та пружно деформованого матеріалу, відповідно.

Показано (рис. 6) залежність k від загальної деформації вздовж зразка ϵ_y для вуглепластикового хаотично армованого композита.

На пружній ділянці деформування матеріалу (див. рис. 3b), де деформація ϵ_y знаходиться в межах 0,2%, відносна густина смуг не змінюється ($k = 1$), що показано горизонтальною лінією на діаграмі (рис. 6). За пружно-пластичного деформування матеріалу, коли деформація ϵ_y більша за 0,2%, спостерігали зміну залежності k – ϵ_y з горизонтальної на нахилену пряму. На початку нелінійної ділянки діаграми розтягу (точка 2) деформація в околі концентратора напружень у 2 рази збільшується порівняно з пружно деформованою ділянкою ($k = 2$). Прямо пропорційну за-

Таким чином, результати експериментальних досліджень показали, що локальна зміна (збільшення) густини різницевих смуг свідчить про наявність дефектів. Вони можуть бути технологічного характеру (недоліки виготовлення – наприклад, непроклеювання шарів композита), або виникати під час навантаження (розшарування або поява пластичних зон). Для хаотично армованого композита в місці дефекту (появи пластичної зони) локальна густина смуг у 2 рази і більше перевищувала густину смуг бездефектної області. У момент, коли локальна густина різницевих смуг зросла у 5 разів (точка 3 на рис. 3b),

лежність $k-\varepsilon$, спостерігали на всьому проміжку пружно-пластичного деформування матеріалу аж до досягнення межі його міцності (точка 4, рис. 3b). У цій точці утворюється внутрішній дефект у середині зразка, оскільки там виникає тривісний напружений стан і максимальні нормальні напруження, так як за деформування металічних зразків циліндричної форми [7]. У пружно-пластичній області (точка 3) коефіцієнт k зростає у 5–6 разів, а перед руйнуванням (точка 4) – більше як на порядок.

Враховуючи результати досліджень, можна стверджувати, що виникнення внутрішнього дефекту у композитному матеріалі пов'язане зі зміною геометрії його поверхні. Таким чином, контролюючи зміну поверхні композитного матеріалу з високою точністю, можна встановити місце виникнення внутрішнього дефекту за прикладання зовнішнього навантаження.

ВИСНОВКИ

Результати експериментів підтверджують ефективність різницевої спекл-інтерферометрії для дослідження зміни структури поверхневих полів переміщень композитних зразків під час їх деформування та руйнування. На основі запропонованого критерію за аналізом структури поверхневих полів переміщень та її зміни під дією механічних навантажень можна виявляти як технологічні дефекти в композитних матеріалах, так і експлуатаційні в результаті механічних та інших навантажень, а також оцінювати схильність композитів до руйнування за наявності концентраторів напружень.

РЕЗЮМЕ. Разработано методику экспериментальных исследований процессов деформирования и разрушения образцов углепластиковых композитов. Приведено схему экспериментальной установки и проанализировано результаты исследований. Показано эффективность метода электронной спекл-интерферометрии для обнаружения дефектов в углепластиковых композитах, а также для оценки их критического напряженно-деформированного состояния.

SUMMARY. Methodology of experimental research of deformation and fracture processes of coal-plastic composite specimens is developed. The setup chart is represented and the experimental research results are analyzed. The performance of the electronic speckle pattern interferometry method for detecting composite defects as well as for estimating such composite specimen tendency to fracture is demonstrated. New criterion for the defect detecting and estimation of the composite tendency to fracture is proposed.

1. *Диагностика конструкций из металлических и композиционных материалов с применением голографии, электронной спекл-интерферометрии и ширрографии / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, В. В. Савицкий, Н. Г. Кувшинский // Автоматическая сварка. – 2000. – № 9–10. – С. 76–83.*
2. *Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Олійник О. М. Неруйнівний контроль якості та визначення залишкових напружень елементів і вузлів конструкцій з використанням методів голографії, електронної спекл-інтерферометрії та ширрографії // машинознавство. – 2002. – № 1. – С. 3–6.*
3. *Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. – М. Мир, 1986. – 328 с.*
4. *Вороняк Т. І., Муравський Л. І., Гаськевич Г. І. Використання різницевої електронної спекл-інтерферометрії для неруйнівного контролю захисних і відновлювальних покриттів // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – 2005. – Вип. 8. – С. 145–150.*
5. *Вороняк Т. І., Муравський Л. І. Контроль поверхневих переміщень та дефектів зразків конструкційних матеріалів методами електронної спекл-інтерферометрії // Методи та прилади контролю якості. – 2006. – № 16. – С. 41–46.*
6. *Вороняк Т. І., Кметь А. Б., Маланчук Т. М. Виявлення підповерхневих дефектів в зразках конструкційних матеріалів засобами електронної спекл-інтерферометрії // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – 2007. – Вип. 12. – С. 237–242.*
7. *Исследование кинетики разрушения пластичных материалов на заключительной стадии деформирования / А. А. Лебедев, О. И. Марусий, Н. Г. Чаусов, Л. В. Зайцева // Пробл. прочности. – 1982. – № 1. – С. 12–18.*

Одержано 05.11.2012