

УДК 669.017.539.6

КОНТРОЛЬ ПРОЦЕСІВ ДЕФОРМУВАННЯ ТА РУЙНУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗАСОБАМИ ЕЛЕКТРОННОЇ СПЕКЛ-ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ**Т. І. Вороняк, Л. І. Муравський, Я. Л. Іваницький***Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, м. Львів, 79601 тел. (0322) 633-388, e-mail: murav@ipm.lviv.ua*

Розроблено методику експериментальних досліджень процесів деформування та руйнування зразків вуглепластикових композитів. Наведено схему установки та проаналізовано результати експериментальних досліджень. Показано ефективність методу електронної спекл-інтерферометрії для виявлення дефектів у вуглепластикових композитах, а також для оцінювання критичності зразків таких композитів до руйнування. Запропоновано новий критерій виявлення дефекту та оцінювання критичності композиту до руйнування. Наведені результати експериментальних досліджень спекл-інтерферометрії для дослідження зміни структури поверхневих полів переміщень композитних зразків в процесі їх деформування та руйнування.

Ключові слова: композитний матеріал, електронна спекл-інтерферометрія, деформування зразків.

Разработано методику экспериментальных исследований процессов деформирования и разрушения образцов углепластиковых композитов. Приведено схему установки и проанализировано результаты экспериментальных исследований. Показано эффективность метода электронной спекл-интерферометрии для обнаружения дефектов в углепластиковых композитах, а также для оценки критичности образцов таких композитов к разрушению. Предложено новый критерий определения дефекта и оценки критичности композита к разрушению. Приведены результаты экспериментальных исследований спекл-интерферометрии для исследования изменения структуры поверхностных полей перемещений композитных образцов в процессе их деформирования и разрушения.

Ключевые слова: композитный материал, электронная спекл-интерферометрия, деформирование образцов.

Methodology of experimental research of coal-plastic composite deformation and fracture processes is developed. The setup layout is represented and the experimental research results are analyzed. The performance of electronic speckle pattern interferometry method to detecting composite defects as well as to estimating the criticality of such composite specimens to fracture is demonstrated. New criterion for defect detecting and estimation of composite criticality to fracture is proposed. The experimental results with speckle interferometry to study changes in the structure of the surface displacement field of composite specimens during their deformation and fracture.

Keywords: composite material, electronic speckle pattern interferometry, specimen deformation.

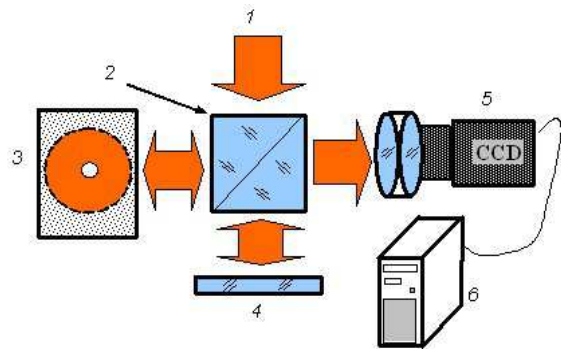
Новітні технології, що використовуються у сучасному промисловому виробництві, вимагають розвитку нових високопродуктивних експериментальних засобів для діагностики та контролю нових конструкційних матеріалів. Серед сучасних і перспективних конструкційних матеріалів особливо важливу роль у машинобудуванні 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 параметрів композиційних матеріалів,

зокрема шаруватих композитів, ускладнене значною анізотропією, яка пов'язана із неоднорідністю структури. Сучасні технології виготовлення композитів не забезпечують їх без дефектності. Тому задача своєчасного виявлення та аналізу дефектів для запобігання руйнуванню конструкції або прогнозування її залишкового ресурсу методами неруйнівного контролю та технічної діагностики є надзвичайно актуальною. Розвиток сучасних методів візуалізації полів деформацій та напружень дозволяє на якісно новому рівні ставити питання про діагностику матеріалів та їх з'єднань. Одним із таких сучасних методів діагностики є електронна спекл-

інтерферометрія (ЕСІ) [1÷4].

Для дослідження процесів деформування та руйнування зразків конструкційних композитних матеріалів було створено установку, що поєднувала спекл-інтерферометр та навантажувальну машину. Для спекл-інтерферометра було вибрано схему Тваймана-Гріна, (рис. 1). Вибір такого типу інтерферометра обумовлений результатами попередніх експериментальних досліджень балкових і листових зразків конструкційних матеріалів, які показали, що спекл-інтерферометри, чутливі саме до поздовжніх переміщень, мають перевагу під час виявлення та ідентифікації дефектів [4÷6]. Перевага полягає в тому, що дефект, по-перше, виявляється при значно менших навантаженнях, а, по-друге, – за картиною різницевих смуг переміщень поверхні можна приблизно визначити місце розташування дефекту і його розміри та прослідкувати за появою та поширенням тріщин.

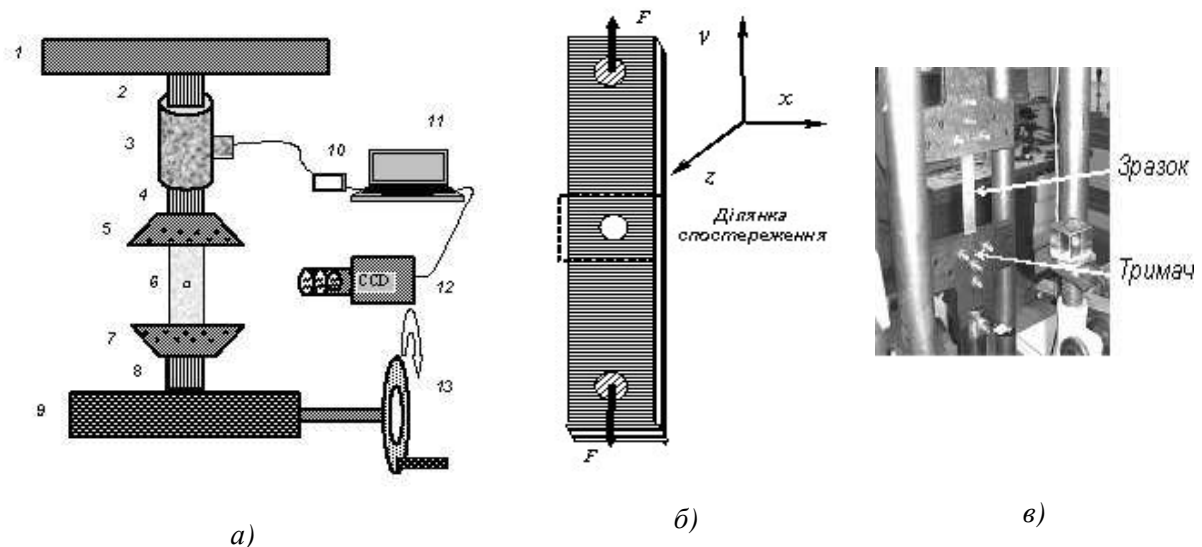
Навантажувальна машина була розміщена біля інтерференційного стола СИН-1, на якому монтувався спекл-інтерферометр. За допомогою даної машини зразки статично навантажували розтягом аж до їх руйнування. Схема навантажувальної машини та загальний вигляд частини експериментальної установки показані на рис. 2.



1 – розширений лазерний промінь;
2 – світлоподільник; 3 – зразок, що досліджувався; 4 – опорне дзеркало;
5 – відеокамера; 6 – ПК

Рисунок 1 – Оптична схема спекл-інтерферометра

Під час проведення експериментів об'єктами досліджень були зразки з вуглепластикових композитів (рис. 3), шаруваті (до 12 шарів) та з хаотично армованими волокнами. Ділянка спостереження становила приблизно $30 \times 40 \text{ мм}^2$ і вибиралася в околі концентратора напружень у вигляді отвору по середині зразка $\varnothing 3 \text{ мм}$ для шаруватих зразків та $\varnothing 5 \text{ мм}$ для зразків з хаотично армованими волокнами.



1 – нерухома плита; 2,4,8 – тяги; 3 – динамометр; 5,7 – тримачі; 6 – зразок; 9 – редуктор з гвинтовим механізмом; 10 – індикаторний пристрій для контролю величини навантаження;
11 – комп'ютер; 12 – відеокамера; 13 – маховик ручного приводу

Рисунок 2 – Схеми навантажувальної машини (а), навантаження зразків розтягом (б) та загальний вигляд зразка в машині (в)

На дані ділянки поверхонь зразків наносився тонкий шар дрібнодисперсної алюмінієвої фарби, що дозволило підвищити коефіцієнт відбивання світла, забезпечити його рівномірність та формувати контрастні картини різницевої кореляційних смуг.

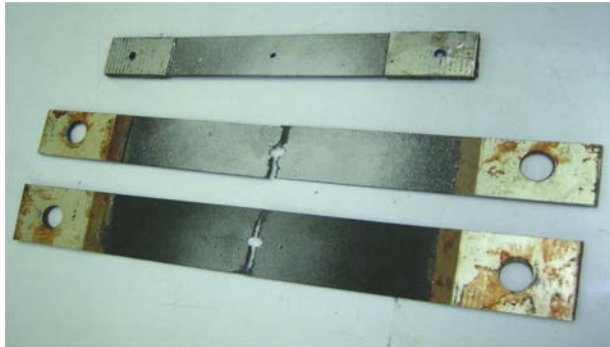
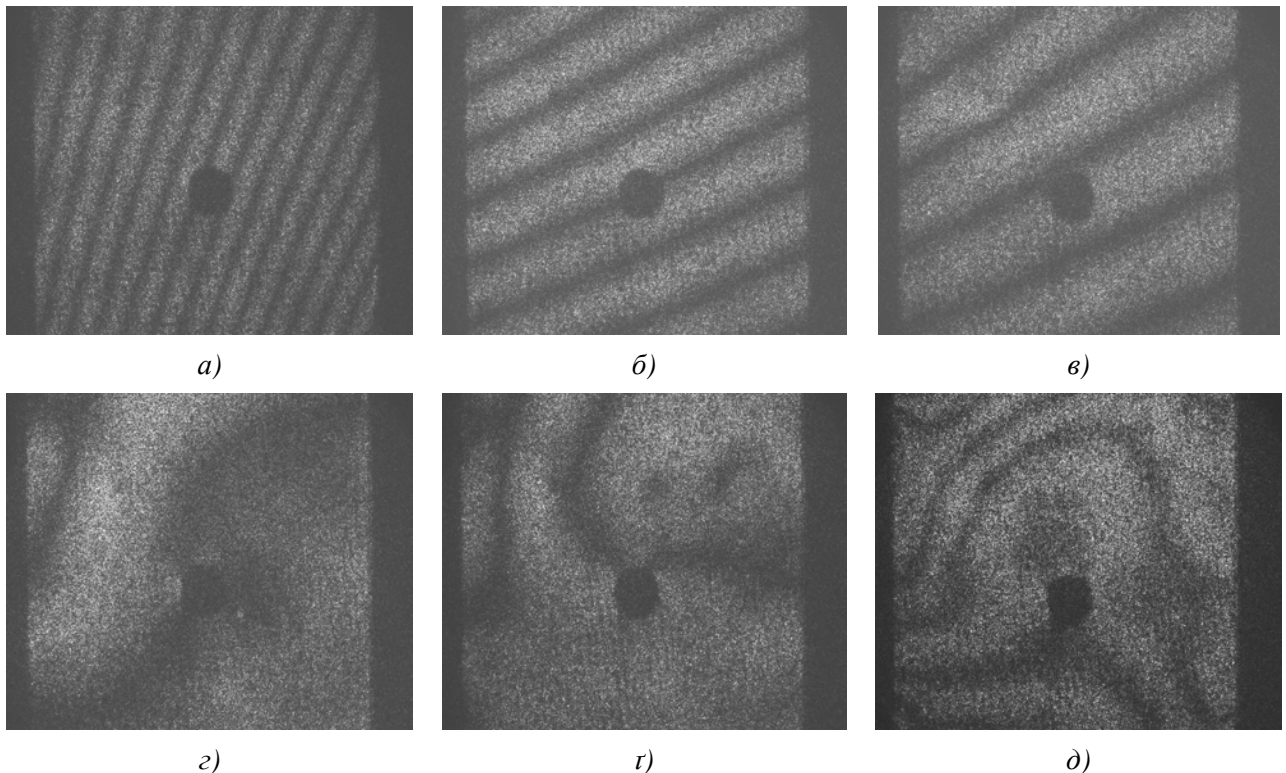


Рисунок 3 – Досліджувані зразки: листові вуглепластикові та шаруваті композити

Наведені на рис. 4 картини різницевої смуг – результат переміщення поверхні шаруватого зразка вздовж нормалі до неї під дією прикладеного навантаження. Для кожного

випадку (кожної картини) зразок спочатку навантажували до заданої величини (попереднє навантаження – конкретна точка на діаграмі розтягу (рис. 5, а) і реєстрували спекл-інтерферограму (СІ) його поверхні. Потім додавали ще невелике навантаження (для даного зразка з шаруватого композиту не більше, ніж 60 кгс) і знову реєстрували СІ поверхні. Далі ці СІ порівнювали (шляхом віднімання) для отримання картини різницевої смуг (різницевої СІ). Нагадаємо, що кожна смуга на різницевої СІ відповідає геометричному місцю точок (пікселів) однакового переміщення поверхні вздовж нормалі, причому між сусідніми смугами різниця в переміщенні поверхні становить $\lambda/2$ або 316,4 нм (λ – довжина хвилі лазерного випромінювання).

При навантаженні даного зразка до 800 кгс картина різницевої смуг була однорідною (однорідним було і поле переміщень чи деформацій поверхні на ділянці спостереження) і вплив концентратора не був помітний. При більших навантаженнях картина смуг змінилася: смуги викривилися в околі концентратора напружень.



a – 126 кгс; б – 400 кгс; в – 800 кгс; г – 950 кгс; ґ – 1100 кгс; д – 1300 кгс

Рисунок 4 – Різницеві спекл-інтерферограми шаруватого композитного зразка, який навантажували розтягом

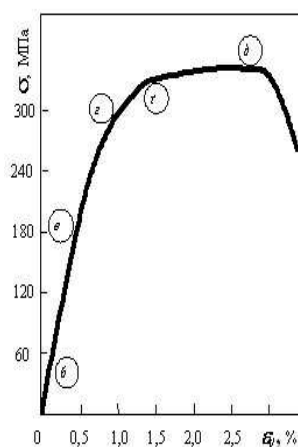
Це викривлення наростало із збільшенням навантаження. Конфігурація смуг на різницевій СІ при навантаженні, яке близьке до критичного (для даного зразка 1300 кгс), показана на рис. 4, д.

Смуги у вигляді кілець свідчать про появу здуття або западини на поверхні зразка, що, в свою чергу, може бути викликане розшаруванням композитного матеріалу.

Таке припущення підтвердилось після того, як даний зразок був розрізаний ще до повного руйнування. На рис. 5, а показана діаграма розтягу зразка та місця на ній, що відповідають різницеvim СІ, наведеним на рис. 4, а на рис. 5, б – загальний вигляд розрізаного зразка у напрямку спостереження.

На рис. 6, а показаний поперечний переріз по лінії розрізу, а на рис. 6, б – збільшене зображення поперечного розрізу в місці розшарування зразка (світла еліпсоподібна пляма). На рис. 6, в наведено аналогічний зразок (вид збоку – перпендикулярно до напрямку спостереження) вже після повного руйнування. Як видно з рис. 6, в місці руйнування зразок повністю розшарований. Отже, за даними результатами еспериментальних досліджень можна зробити висновок, що руйнуванню шаруватого композиту передують його розшарування, яке можна виявити методом електронної СІ.

Інший, вуглепластиковий хаотично армований композитний зразок навантажували розтягом аж до його руйнування. На рис. 7 показані різницеві спекл-інтерферограми для різних точок діаграми розтягу.



а)

б)

Рисунок 5 – Діаграма розтягу багат шарового композиту (а) та загальний вигляд розрізаного зразка (б)

Сама діаграма розтягу показана на рис. 8. Для даного зразка величина різницевого навантаження не перевищувала 30 кгс.

При навантаженні зразка до 600 кгс картина різницевих смуг є однорідною (однорідними є поля переміщень чи деформацій поверхні на ділянці спостереження) і вплив концентратора напружень непомітний. При більших навантаженнях картина смуг змінюється, смуги викривляються в околі концентратора напружень.



а)



б)



в)

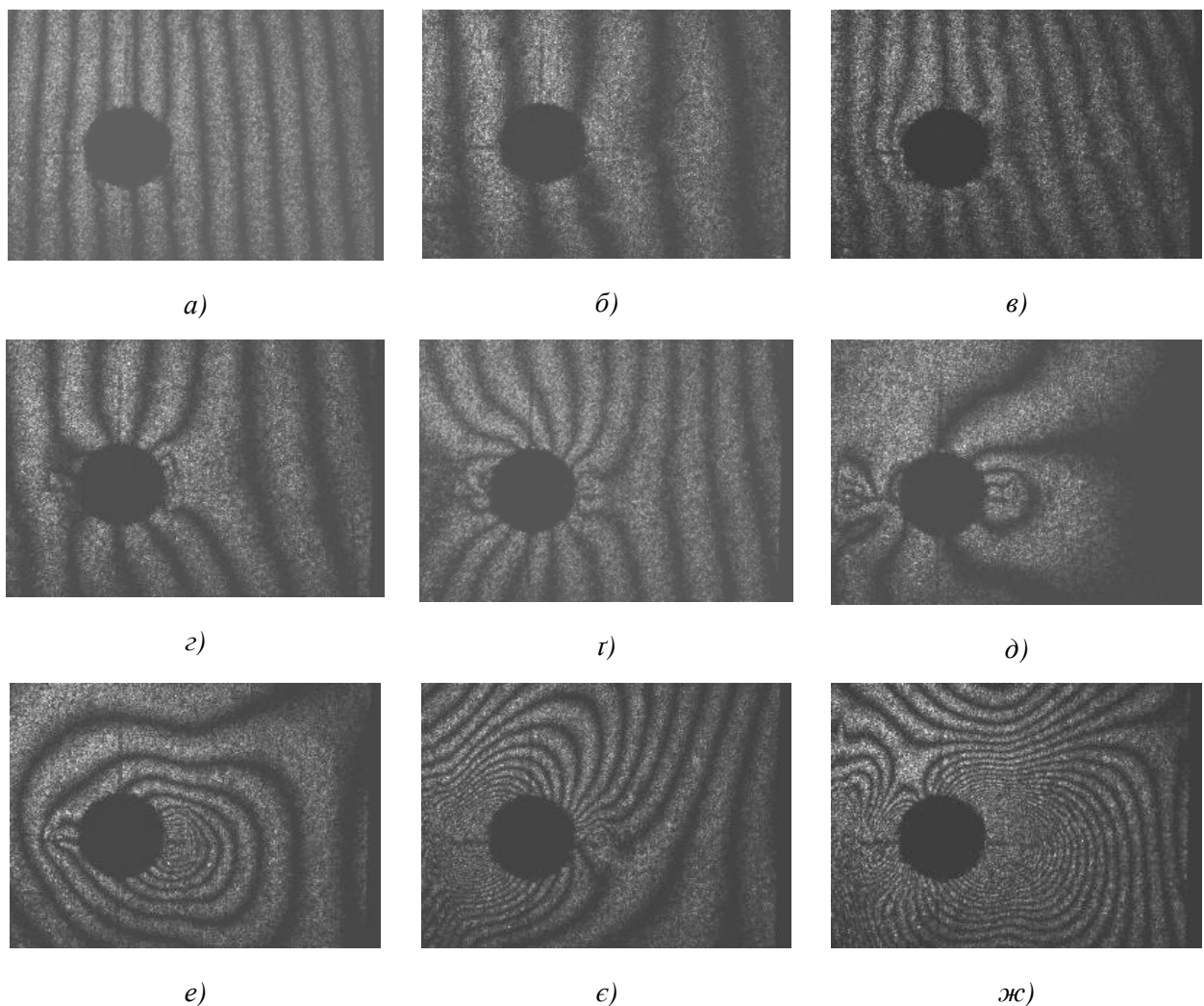
Рисунок 6 – Загальний вигляд зразків в місці розрізу (а) і (б) та в місці руйнування (в)

Це викривлення наростає з наростанням величини навантаження (попереднє навантаження) і найбільша їх густина (тобто деформація зразка) спостерігається в околі концентратора напружень. За навантаження 1360 кгс зразок зруйнувався. Але ця руйнація відбулася не відразу після прикладеного навантаження, а приблизно через 2 хв і за той час покази динамометра зменшились приблизно на 200 кгс. За той же час змінилась і картина різницевої смуг – збільшилась густина смуг в околі концентратора, як це видно з рис. 7, *є* та рис. 7, *ж*.

Як показали результати експериментальних досліджень, локальна зміна (збільшення) густини різницевої смуг свідчать про наявність

дефекту. Дефекти можуть бути технологічного характеру (недоліки процесу виготовлення – наприклад, непроклеювання шарів композиту), або виникати під час навантаження (розшарування або поява пластичних зон).

За аналізом локальних густин смуг можна робити висновок про наявність дефекту, а також про його критичність до руйнування. Для даного хаотично армованого композиту в місці дефекту (появи пластичної зони) локальна густина смуг у 2 рази і більше перевищує густину смуг бездефектної (пружної) області. А коли локальна густина різницевої смуг є у 5 разів вищою – зразок руйнувався в даному місці (рис. 7).



а – 400 кгс; *б* – 600кгс; *в* – 800 кгс; *г* – 1150 кгс; *т* – 1270 кгс, *д* – 1310 кгс, *е* – 1350 кгс; *є* – 1360 кгс; *ж* – 1160 кгс

Рисунок 7 – Різницеві спекл-інтерферограми за попереднього навантаження зразка

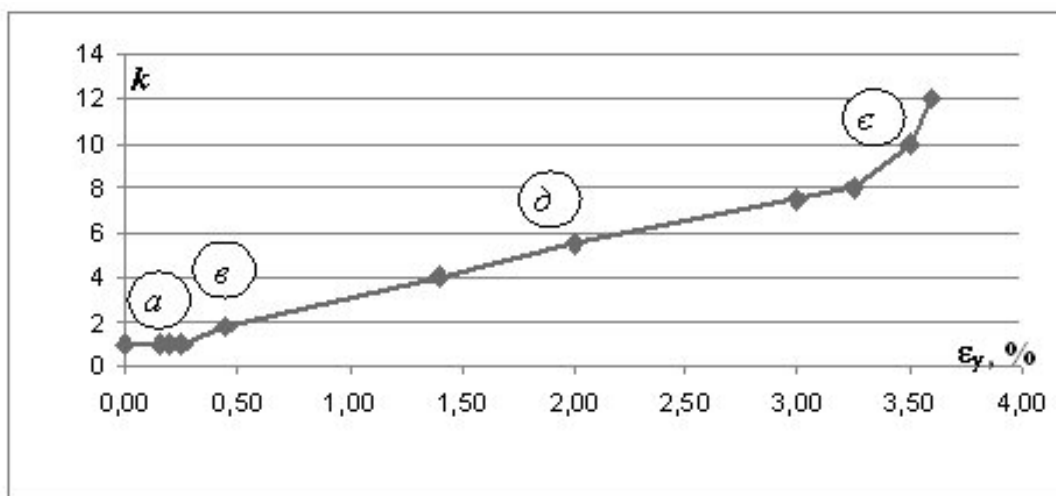


Рисунок 8 – Залежність відносної локальної густини смуг k від загальної деформації вздовж зразка ϵ_y

Тому кількісний показник нормованої локальної густини можна розглядати як критерій виявлення дефекту та оцінювання критичності композиту до руйнування. Його можна характеризувати коефіцієнтом відносної локальної густини смуг k :

$$k = \frac{N_{nl}}{N_{np}},$$

де N_{nl} – густина смуг в пластичній зоні; N_{np} – густина смуг в пружній зоні.

На рис. 8 показана залежність k від загальної деформації вздовж зразка ϵ_y для вуглепластикового хаотично армованого композиту.

Дана залежність побудована на основі аналізу різницевої СІ, частина з яких показана на рис. 7. Буквами в кружечках вказано саме різницевої СІ, що відповідають деяким точкам цієї залежності.

Отже за величиною k можна судити про наявність локального дефекту у вибраній ділянці композиту а також про критичність композиту до руйнування.

Дослідження процесу руйнування вуглепластикових композитів методом електронної СІ показали, що на лінійній ділянці діаграми розтягу розподіл деформацій по поверхні зразка є однорідним (відносна густина смуг $k=1$). На початку нелінійної ділянки діаграми розтягу величина деформацій в околі концентратора напружень в 2 рази більша

($k=2$). При збільшенні величини навантажень k зростає, і за величини навантажень, близьких до критичних, величина деформацій в околі концентратора напружень більше, ніж в 10 разів перевищує деформації поверхні зразка поза зоною пластичності, тобто $k > 10$.

ВИСНОВКИ

Наведені результати експериментальних досліджень показують ефективність різницевої спекл-інтерферометрії для дослідження зміни структури поверхневих полів переміщень композитних зразків в процесі 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 ті, що виникають в результаті механічних та інших напружень, а також оцінювати критичність композитів до руйнування у місцях розташування дефектів.

1. *Диагностика конструкций из металлических и композиционных материалов с применением голографии, электронной спекл-интерферометрии и широчасти/Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Савицкий В.В., Кувшинский Н.Г.//Автоматическая сварка. – 2000. –№9–10. С.76–83.* 2. *Неруйнівний контроль якості та визначення залишкових напружень елементів і вузлів конструкцій з використанням методів голографії, електронної спекл-інтерферометрії*

та ширографії Лобанов Л.М., Півторак В.А., Олійник О.М.//Машинознавство. – 2002. – №1. – С.3–6. 3. Голографическая и спекл-интерферометрия. Джоунс Р., Уайкс К. – М. Мир, 1986. – 328с. 4. Використання різницевої електронної спекл-інтерферометрії для неруйнівного контролю захисних і відновлювальних покриттів / Вороняк Т.І., Муравський Л.І., Гаськевич Г.І. //Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – Львів – 2005. – Вип. 8 – С.145–150. 5. Контроль поверхневих переміщень та дефектів зразків конструкційних матеріалів методами електронної спекл-інтерферометрії / Вороняк Т.І., Муравський Л.І. // Методи та прилади

контролю якості. Івано-Франківськ –2006– №16 – С. 41–46. 6.Виявлення підповерхневих дефектів в зразках конструкційних матеріалів засобами електронної спекл-інтерферометрії / Вороняк Т.І., Кметь А.Б., Маланчук Т.М. // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. Неруйнівний контроль та технічна діагностика матеріалів і конструкцій – Львів – 2007. – Вип. 12– С. 237–242.

Поступила в редакцію 16.04.2012 р.

**Рекомендував до друку докт. техн. наук,
проф. Лютак І. З.**