

УДК 539.375:681.7

**В. Болейчук**

*Тернопільський національний економічний університет*

## **ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ІНТЕНСИВНОСТІ НАПРУЖЕНЬ У КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ СПЕКЛ-КОРЕЛЯЦІЇ**

*Резюме.* Розроблено методику визначення коефіцієнта інтенсивності напружень в околі вершини тріщини композитного матеріалу за величиною переміщень берегів тріщини, виміряних методом спекл-кореляції. За розробленою методикою встановлено величину коефіцієнта інтенсивності напружень для ребристої панелі.

*Ключові слова:* композитний матеріал, коефіцієнт інтенсивності напружень, переміщення берегів тріщини, спекл-зображення поверхні зразка.

**V. Boleychuk**

## **DETERMINATION OF THE STRESS INTENSITY COEFFICIENT IN COMPOSITE MATERIALS USING THE METHOD OF SPECKLE CORRELATION**

*The summary.* The method is developed for determining the coefficient of stress intensity in the vicinity of crack tip composite material after the value of the banks crack displacements measured by speckle correlation method. After the developed method the value of stress intensity factor for ribbed panel was determined.

*Key words:* composite material, stress intensity coefficient, displacement of crack banks, speckle image of the sample surface.

**Постановка проблеми.** Під час експлуатації деякі елементи конструкцій піддаються тривалому циклічному навантаженню. Внаслідок цього біля конструктивних концентраторів напружень виникає втомна тріщина, яка може підростати до критичних розмірів. Оцінити напружено-деформований стан біля такої тріщини, або визначити граничні навантаження за наявності тріщини можна лише на основі підходів механіки руйнування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відомі підходи [1, 2] передбачають визначення характеристики тріщиностійкості матеріалу на зразках у лабораторних умовах та уможливають розрахунок напружено-деформованого стану. Однак у випадку, коли елемент конструкції має складну геометрію, такий розрахунок утруднюється.

У працях [3, 4] запропоновано новий підхід щодо розрахунково-експериментального методу прогнозування розвитку пластичних деформацій та напрямку поширення тріщин у шаруватому композитному матеріалі. На основі даного методу показано, що експериментальні дослідження з визначення кута поширення тріщини, отримані методом цифрової спекл-кореляції, добре збігаються з теоретичними розрахунками.

**Актуальність та основні досягнення.** В останні роки оптичні методи вимірювання параметрів спеклів набувають все більшого поширення та розвитку. Завдяки можливості досліджувати мікроструктуру оптично шорстких поверхонь вони вважаються одними з найефективніших методів оптичного неруйнівного контролю та діагностування композитних і конструкційних матеріалів, що застосовуються в експериментальній механіці [5].

Для визначення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) розроблені методики, які передбачають випробування зразків різної геометричної форми. Разом з

тим використання такої методики для оцінювання величини КІН в елементах конструкцій для визначення напружено-деформованого стану в околі концентраторів напружень (тріщин) є досить обмеженим. Розроблена методика, яка б дозволяла визначати КІН не тільки у зразку, але й в елементі конструкції за експлуатаційних умов навантаження, є важливою в плані оцінювання реального напружено-деформованого стану, зокрема в елементах ребристої форми з тріщиною.

**Мета роботи** – розроблення та обґрунтування методики визначення коефіцієнта інтенсивності напружень у навантажених елементах ребристої форми за величиною переміщень берегів тріщини.

**Методика та результати досліджень.** У роботі запропоновано оцінювати напружено-деформований стан біля надрізів тріщин на основі силового підходу – коефіцієнта інтенсивності напружень [1, 2].

За цим підходом експериментальним шляхом визначають розподіл переміщень в околі вершини тріщини методом спекл-кореляції [3, 5] та, використавши розподіли переміщень і напружень [2], встановлюють величину КІН за прикладання зовнішнього навантаження.

Пластинчастий зразок із композитного матеріалу 1 на основі матриці з поліефірної смоли марки ПН-15 товщиною  $t = 2$  мм з центральною тріщиною довжиною  $2l$  навантажували розтягом на випробувальній машині EUS-20 (рис. 1). До зразка 1 на лінії тріщини закріплюють платформу 2, на якій встановлено джерело світла 3 і ПЗЗ-камера (камера на базі приладів із зарядовим зв'язком) VQ29A 4 для реєстрації деформівної ділянки поверхні зразка 5 в околі вершини тріщини. На протилежній стороні зразка біля тієї ж вершини тріщини закріплюють тензодавач 6 вимірювання переміщення берегів тріщини у фіксованому місці.

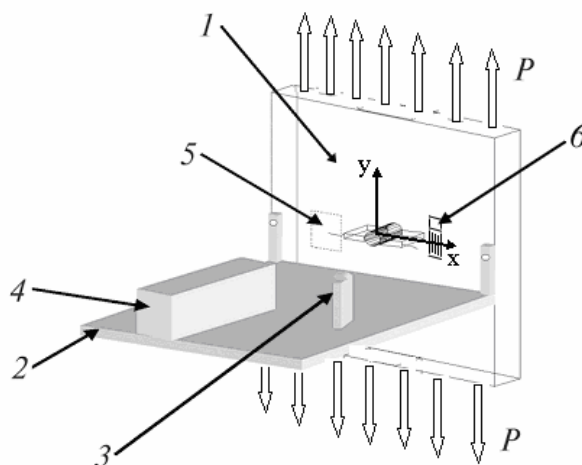


Рисунок 1. Схема реєстрації спекл-зображень біля вершини тріщини: 1 – зразок; 2 – платформа; 3 – джерело світла; 4 – ПЗЗ-камера; 5 – зона спостереження; 6 – тензодавач

Враховуючи, що тензодавач вимірює розкриття берегів тріщини між двома точками тільки на одній прямій від вершин, необхідно уточнити й регламентувати спосіб визначення КІН. Метод спекл-кореляції дає змогу визначити не тільки розкриття у фіксованому місці, а й розподіл переміщень берегів тріщини на зазначеній ділянці біля вершини тріщини для різних баз деформування у двох взаємно перпендикулярних напрямках. КІН  $K_I$  за розробленою методикою визначали таким чином. За даними

розподілу переміщень берегів тріщини на різних відстанях від її вершини, зареєстрованих ПЗЗ-камерою при навантаженні зразка, будують залежність «переміщення берегів тріщини  $\Delta$  – відстань від вершини тріщини до точки вимірювання  $r$ ». Відстань від вершини тріщини до точки вимірювання в межах інтервалу вимірювання  $0,05l$  ( $l$  – довжина тріщини) розбивають на рівні проміжки з кроком  $0,12$  мм, що відповідає розміру спекла.

Розроблену методику і точність визначення КІН  $K_I$  перевірено за розтягування пластинчастого зразка шириною  $b = 120$  мм і товщиною  $t = 2$  мм із композитного матеріалу на основі матриці з поліефірної смоли марки ПН-15. Розкриття берегів тріщини реєстрували біля однієї вершини при збільшенні навантаження зразка ступенями  $0,1P_*$  (де  $P_*$  – зусилля, що відповідає старту тріщини). Після обробки спекл-зображень визначали переміщення берегів тріщини в 5-ти точках з кроком  $0,12$  мм на відстані  $0,6$  мм від вершини тріщини.

Використавши аналітичні співвідношення для визначення розподілу переміщень і напружень в околі контуру тріщини нормального відриву, що отримані в рамках моделі ідеально пружного тіла [2], і провівши нескладні перетворення, отримаємо залежність величини КІН –  $K_I$  від переміщень  $\Delta_i$ . Для обчислення  $K_I$  використовуємо вертикальне переміщення ( $\Delta_i$ ) берегів тріщини, оскільки воно є більшим за переміщення вздовж лінії тріщини і тому вимірюється з більшою точністю. Знаючи величину вертикальних переміщень берегів тріщини біля її вершини, значення  $K_I$  для плоского напружено-деформованого стану обчислюємо за формулою

$$K_I = \Delta \frac{E}{8} \sqrt{\frac{2\pi}{r}}, \quad (1)$$

де  $E$  – модуль пружності матеріалу зразка.

За величиною переміщень берегів тріщини на різних відстанях від вершини тріщини, які замірювали методом спекл-кореляції, будували залежність  $\Delta = f(r)$ . На рис. 2 точками показано експериментальну залежність вертикального переміщення  $\Delta$  від відстані до вершини тріщини  $r$  для зразка з центральною тріщиною довжиною  $20$  мм із композитного матеріалу на основі поліефірної смоли марки ПН-15. Також на рис. 2 наведено лінію, яку побудовано за формулою (1). Як бачимо з рис. 2, дані експериментальних вимірювань (1) і розрахункові величини (2) добре узгоджуються між собою, що вказує на правомірність використання такого підходу.

Особливістю вимірювання переміщень методом спекл-кореляції є те, що за цим підходом можна визначити також розподіл деформацій на ділянці передруйнування, у якій деформації перевищують пружну величину [3]. Відповідно до цього, за пластичну зону приймають обмежену ділянку матеріалу біля вершини тріщини або її довжину  $L_P$  на лінії продовження тріщини, у якій величина деформацій перевищує  $0,25\%$ , що відповідає умовній границі текучості для композитних матеріалів.

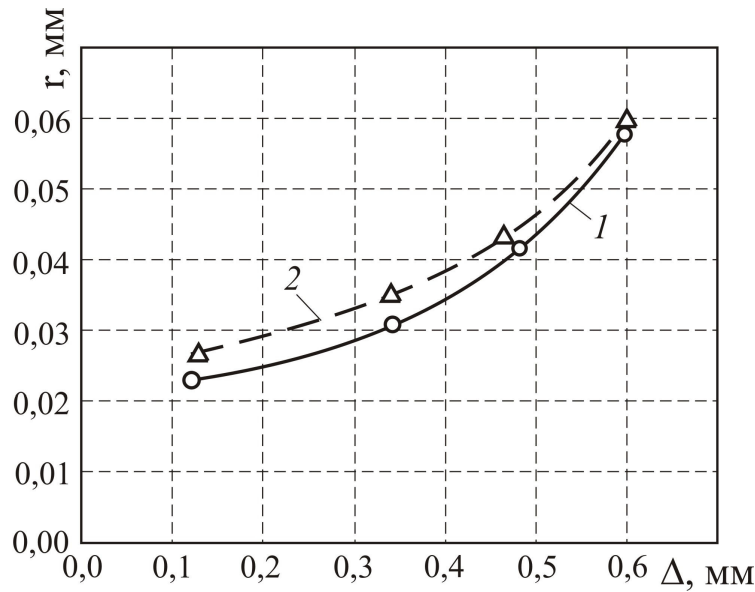


Рисунок 2. Залежність переміщення берегів тріщини  $\Delta$  від до точки вимірювання  $r$  за розтягу зразка розмірами  $2 \times 200$  мм із поліефірної смоли ПН-15: 1 – дані експериментальних вимірювань; 2 – розрахункові величини

Таким чином, при досягненні гранично-рівноважного стану у вершині тріщини за розподілом деформацій можна визначити критичне значення деформації  $\varepsilon_c$ , що відповідає критичній деформації, визначеній за стандартного випробування суцільного зразка  $\varepsilon'_c$ . Для нашого випадку величина  $\varepsilon_c$  визначена за розподілом деформацій методом спекл-кореляції становить 5,5%, встановлена величина  $\varepsilon_c$  при випробуванні суцільного зразка є меншою на 60%. Це вказує, що локальна деформація матеріалу біля вершини тріщини, при досягненні гранично-рівноважного стану, визначена методом спекл-кореляції, є більшою за усереднену критичну деформацію, визначену при руйнуванні суцільного зразка.

Довжина пластичної зони  $L_P$  для композитного матеріалу на основі поліефірної смоли марки ПН-15 на продовженні тріщини дорівнює 3,5 мм.

Руйнування матеріалу біля вершини тріщини відбувається в локальному об'ємі при досягненні деформацією критичного значення або критичного КІН  $K_C$ . При навантаженні зразка діаграму « $P \sim \delta$ » (зусилля навантаження – розкриття берегів тріщини) реєструють на персональному комп'ютері (ПК) за стандартною методикою [1]. Характеристику тріщиностійкості визначають за формулою для пластинчастого зразка з центральною тріщиною [1]

$$K_C = \frac{P_* y(\varepsilon)}{t \sqrt{b}}, \quad (2)$$

де  $y(\varepsilon)$  – поправочна функція.

$$y(\varepsilon) = 0,380 \left[ 1 + 2,308 \left( \frac{2l}{b} \right) + 2,439 \left( \frac{2l}{b} \right)^2 \right], \quad 2l - \text{довжина тріщини.}$$

Таким чином, визначивши величину  $K_C = 60 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$  для матеріалу на основі поліефірної смоли марки ПН-15 за цією методикою, підставляють її у формулу (1), з якої обчислюють значення  $\Delta_i^*$ , і будують залежність (2) (рис. 2, крива 2). Аналіз

результатів показує, що розходження даних за двома підходами не перевищує 5%.

Це дає підстави вважати, що такий підхід можна використати для оцінювання напружено-деформованого стану в елементах конструкцій з тріщиноподібними дефектами, де є можливість вимірювати розкриття берегів тріщини методом спекл-кореляції. Визначивши величину переміщення берегів тріщини в елементі конструкції за максимального навантаження, а також тріщиностійкість матеріалу в лабораторних умовах, що наближений до експлуатаційних, можна оцінити залишкову міцність або визначити критичну силу, при якій відбудеться руйнування елемента конструкції.

Розроблена методика використана для визначення критичного зусилля руйнування у ребристій (стільниковій) панелі з композитного матеріалу, які використовують у літакобудуванні (рис. 3).

Товщина панелі 12 мм, ребер жорсткості – 2,0 мм. Відстань між осями ребер становить 30 мм, висота ребер – 10 мм. Оскільки зона пластичності  $L_P$  для композитного матеріалу на основі поліефірної смоли марки ПН-15 біля вершини тріщини визначена на зразку методом спекл-кореляції становить 3,5 мм, а відстань від вершини тріщини до ребра – 5 мм, то впливу ребра на локальне руйнування не буде.

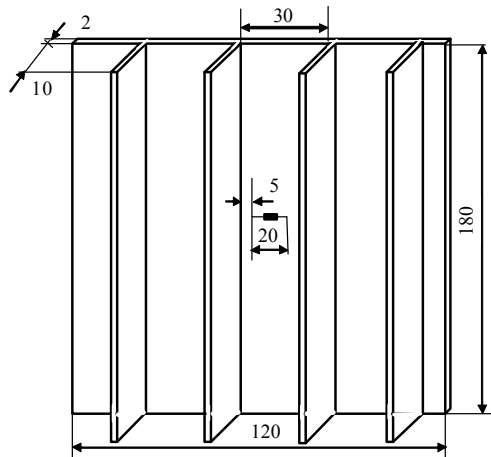


Рисунок 3. Ескіз зразка з ребристої панелі

Тому встановлення гранично-рівноважного стану ребристої плити в локальному об'ємі з використанням запропонованої методики буде адекватним як і у випадку плоского зразка. Втомну тріщину вирошували від отвору  $\varnothing 3$  мм і надрізу до довжини  $2l = 20$  мм. Після цього панель через спеціальні захоплювачі закріплювали у розривній машині й навантажували розтягом до моменту старту тріщини. Біля вершини втомної тріщини на її продовженні з гладкого боку закріплювали платформу з ПЗЗ-камерою, аналогічно, як це показано на рис. 1. Під час навантаження ступенями реєстрували величину переміщення берегів тріщини ПЗЗ-камерою  $\Delta_i$  до моменту старту тріщини, а також величину зусилля  $P_i$ . За величиною  $\Delta_i$  за формулою (1) обчислювали величину  $K_i$  для кожного ступеня навантаження зразка. Критичне значення цієї величини для ребристої панелі відповідає  $K_c$ , яка становить  $66,4 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ .

Аналіз результатів експериментальних досліджень показує, що неруйнівні методи контролю, зокрема метод спекл-кореляції, можна використовувати для визначення допустимого зусилля навантаження або залишкової міцності елементів конструкції під час експлуатації.

Дані, отримані за допомогою розробленої методики визначення КІН у зразку через розкриття берегів тріщини, задовільно узгоджуються із характеристиками опірності руйнуванню композитних матеріалів за стандартною методикою [1]. Розроблена методика може бути ефективною в плані використання її до оцінювання несучої здатності елементів конструкцій складної геометрії з композитних матеріалів із урахуванням експлуатаційних умов.

**Висновки.** Розроблено методику визначення КІН у реальних елементах конструкцій стільникового типу з тріщиною за величиною переміщень її берегів. Показано, що похибка при визначенні КІН для композиту на основі поліефірної смоли марки ПН-15 за розробленою методикою порівняно зі стандартним підходом становить 5%. Визначено характеристики тріщиностійкості для ребристого елемента конструкції з композиту на основі поліефірної смоли марки ПН-15 та показано ефективність застосування розробленої методики до оцінювання залишкової міцності.

### **Список використаної літератури**

1. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении; [Розрахунки і випробовування на міцність. Методи механічних випробовувань металів. Визначення характеристик тріщиностійкості (в'язкості руйнування) за статичного навантаження] [Текст]. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 62 с.
2. Панасюк, В.В. Механика разрушения и прочность материалов: справочное пособие в 4 т. [Текст] / В.В. Панасюк, А.Е. Андрейкив, В.З. Партон // Основы механики разрушения; под ред. В.В. Панасюка. – К.: Наукова думка, 1988. – Т.1. – 488 с.
3. Панасюк, В.В. Аналіз пружно-пластичного деформування матеріалу зони передруйнування [Текст] / В.В. Панасюк, Я.Л. Іваницький, О.П. Максименко // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – № 5. – С. 67–72.
4. Моделирование та експериментальна верифікація прогнозування напряму поширення тріщин у шаруватих композитах [Текст] / Л. Муравський, О. Гембара, М. Гвоздюк, Т. Половинко, В. Болейчук // Механіка руйнування і міцність конструкцій; за заг. ред. В.В. Панасюка. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2009. – С. 479–484.
5. Муравський, Л.І. Методи спекл-кореляції для дослідження механічних властивостей конструкційних матеріалів [Текст] / Л.І. Муравський. – К.: Наукова думка, 2010. – 208 с.

*Отримано 05.12.2011*