

УДК: 621:3

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ¹, С. Т. ШТАЮРА¹, М. КОВАЛІК²

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

² Політехніка Радомська, Польща

Запропоновано методику визначення деформації, довжини пластичної зони та розкриття тріщини біля її вершини за допомогою методу цифрової спекл-кореляції та тензометрії за одно- та двовісного розтягів пластини з центральною тріщиною. Експериментально встановлено, що розмір пластичної зони біля вершини тріщини для даного матеріалу (не залежить від бази вимірювання), але змінюється з переходом до двовісного навантаження. На основі розв'язку пружно-пластичної задачі про гранично-рівноважний стан пластини з тріщиною в межах δ_c -моделі отримано формулу для обчислення усередненого значення тріщиностійкості матеріалу ($\bar{\delta}_c$) та довжини пластичної зони (l_{p*}). Оцінено вплив двовісного навантаження на розмір цієї зони.

Ключові слова: розкриття тріщини в околі її вершини; деформації в зоні передруйнування; довжина пластичної зони; цифрова кореляція спекл-зображень; одно- та двовісне навантаження.

Вступ. Деформаційні характеристики тріщиностійкості пружно-пластичних матеріалів, коли біля вершини тріщини формується пластична зона передруйнування, визначають на основі δ_c -моделі [1, 2]. Тут зону передруйнування розглядають як додатковий (модельний) розріз-тріщину, протилежні сторони якої взаємодіють (притягаються) напруженнями σ_0 , а критичне її розкриття δ_c на лінії вершини вихідної тріщини ($2l_0$) [3] і на певній віддалі від неї вимірюють тензодавачами [4] (рис. 1а). Воно змінюється зі зміною бази вимірювання, тобто на відстані між двома точками матеріалу в околі вершини тріщини. Тріщиностійкість матеріалу визначають із рівності $\delta_c = \delta_{p*}$ (рис. 1а), коли викликані зусиллям P напруження $p = p_*$, де p_* – їх значення, за якого стартує тріщина завдовжки $2l_0$ під час розтягу зразка.

Напруження σ_0 в δ_c -моделі характеризують напруження зчеплення між берегами модельної тріщини в зоні передруйнування (в зоні l_p на рис. 1а) і дорівнюють границі текучості σ_{ys} для ідеально пружно-пластичних матеріалів або $\sigma_0 = (\sigma_{ys} + \sigma_u)/2$, де σ_u – границя міцності матеріалу [5]. Знаходження величини δ_c вимірюванням переміщення точок матеріалу в околі вершини тріщини тензодавачами за відомими методиками [2] малоефективне, оскільки результати залежать від бази вимірювання [6].

Нижче описано новий метод вимірювання переміщень точок деформівного тіла в околі вершини вихідної тріщини, визначення розкриття берегів тріщини δ_c біля її вершини, а також довжини зони передруйнування (l_p) на продовженні тріщини за допомогою кореляційної обробки електронних спекл-зображень ділянки матеріалу в околі вершини тріщини.

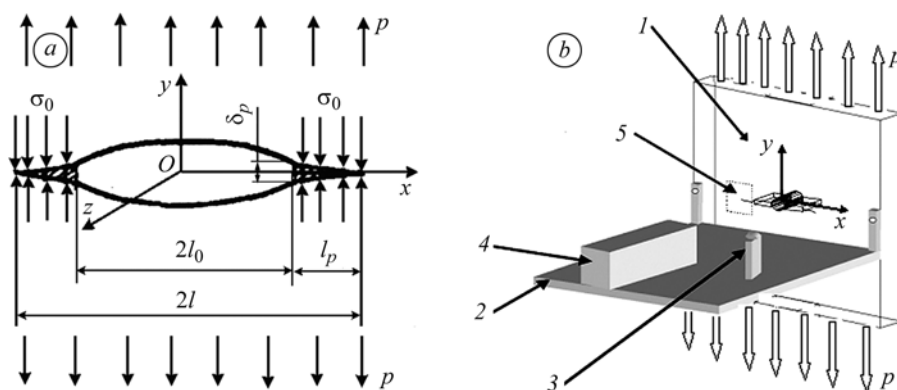


Рис. 1. Схема δ_c -моделі (а) та реєстрації спекл-зображень біля вершини тріщини (б): 1 – зразок; 2 – платформа; 3 – джерело світла; 4 – відеокамера; 5 – зона спостереження.

Fig. 1. A chart of the δ_c -model (a) and speckl-images recording at the crack tip (b): 1 – specimen; 2 – platform; 3 – light source; 4 – video camera; 5 – observation zone.

Матеріал і методика випроб. Досліджували пластинчасті зразки [2] з робочою ділянкою 120×120 mm з центральним розрізом довжиною $2l_0$, радіусом закруглення вершини $\rho < 0,15$ mm зі сталей 08кп і товщиною $t = 1$ mm, 09Г2С (1,5 mm), 65Г (2 mm), дюралі Д16Т (1 mm) за силовою схемою одновісного розтягу [7]. Механічні характеристики матеріалів визначали на плоских зразках (табл. 1) за ГОСТ 1497-84 [8]. Загострювали надріз, тобто утворювали тріщину завдовжки $2l_0$, на універсальній гідравлічній машині EUS-40 за асиметричного циклічного навантаження з асиметрією $R = 0,3$ і частотою $f = 12$ Hz, дотримуючись методичних рекомендацій [2]. Розтяг зразка з тріщиною зусиллями P і зоною передруйнування l_p ілюструє рис. 1а. Тут δ_p і l_p – характерні параметри розрахункової моделі. З одного боку зразка в площині тріщини тензодавачем з гострими кінцями, закріпленими на поверхні зразка, вимірювали переміщення берегів тріщини в околі її вершини (база вимірювання 1,5 mm) [2]. З протилежного боку біля цієї ж вершини методом цифрової кореляції спекл-зображень (ЦКСЗ) [9–11] визначали переміщення на ділянці l_p розміром 3×4 mm.

Таблиця 1. Механічні властивості матеріалів*

Матеріал	σ_{ys}	σ_u	σ_i	δ_{10}	ψ
	МПа			%	
08кп	340	400	760	38	65
09Г2С	290	350	710	21	70
65Г	600	700	1550	12	30
Д16АТ	260	350	440	5	10

* δ_{10} , ψ – відносні видовження та звуження; σ_i – істинні напруження руйнування.

Давач для вимірювання навантаження закріплювали між захоплювачем зразка і установки. Сигнали від давачів переміщення і зусилля реєстрували через аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) на персональному комп'ютері (ПК) у вигляді діаграми $P-\nu_0$ (сила розтягу–переміщення гострих кінців давача). На зворотному боці зразка для реєстрації поля пружно-пластичних переміщень деформованої поверхні в околі вершини тріщини закріплювали платформу з приладами для реалізації методу ЦКСЗ (рис. 1б) так, щоб вісь камери для фотографування була

перпендикулярна до лінії поширення тріщини. Використовували CCD камеру (VQ-29B) з фоточутливою матрицею 1/3 (640×480 пікселі) та мікрооб'єктивом із фокусною відстанню $F = 3,7$ mm та роздільною здатністю 300 line/mm. Деформівну ділянку освітлювали фотодіодом.

Зразок з утомною тріщиною розтягували статичним зусиллям до досягнення критичного значення і поетапно фотографували відеокамерою, встановленою на платформі, ділянку розміром 3×4 mm через кожні 200 kg навантаження, реєструючи її спекл-зображення. Записували діаграму сила P –розкриття v_i біля вершини тріщини.

Розбивши спекл-зображення на квадратні елементи, за відомою методикою [9, 11] обчислювали функції взаємної кореляції пар відповідних фрагментів (0...200 kg; 200...400 kg і т.д.). Положення максимуму кореляційної функції відносно центра фрагмента залежить від відносного зміщення пар фрагментів під навантаженням. Обробляли кожну пару спекл-зображень поверхні за програмою, яка розбиває їх на фрагменти 32×32 пікселі, аналізує кожен фрагмент, визначає зі субпіксельним розділенням координати максимуму кореляційного сигналу в межах фрагмента та інтерполуює числові дані. В результаті отримали поле кореляційних піків різної інтенсивності. Різницю їх максимумів між двома зафіксованими сусідніми зображеннями використовували для побудови полів переміщень, розрахунку деформацій поверхні зразка біля вершини тріщини та визначення її розкриття. Після аналізу і обробки спекл-зображень для деформованої зони (зони передруйнування) встановлювали розподіл деформацій біля вершини тріщини (рис. 2).

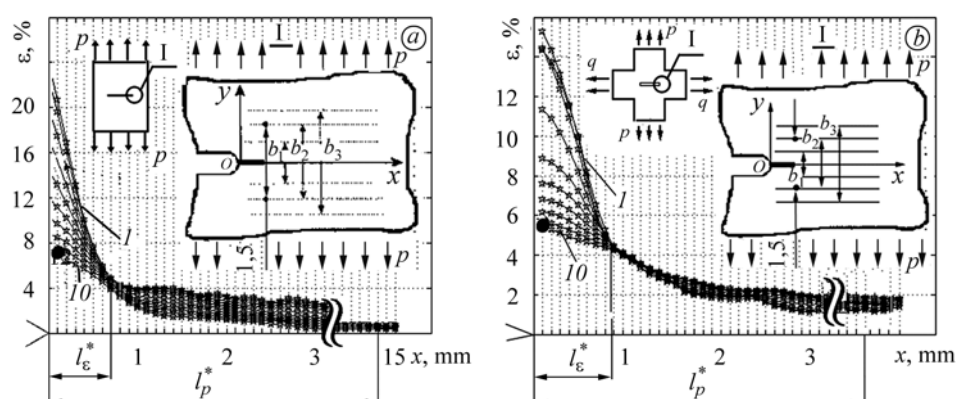


Рис. 2. Розподіл деформацій у зоні передруйнування в сталі 08kp при $p = p_*$ за одно- (a) та двовісного (b) розтягів, встановлений методом ЦКСЗ (база вимірювання від $b_1 = 0,2$ mm (I) до $b_n = 2,0$ mm (10) з кроком 0,2 mm); ● – деформації, розраховані за вимірами тензодавача на базі 1,5 mm на лінії вершини тріщини.

Fig. 2. Distribution of deformations in the process zone in 08kp steel at $p = p_*$ under uniaxial (a) and biaxial (b) tension, established by the Numerical Correlation of Speckl (NSIC) method (measuring base from $b_1 = 0.2$ mm (I) to $b_n = 2.0$ mm (10) with a step of 0.2 mm); ● – deformations by a strain gauge measuring with base 1.5 mm on the crack tip line.

Результати та їх обговорення. За полем пружно-пластичних переміщень в околі вершини тріщини на різних базах вимірювання встановлювали розподіл деформацій у напрямку, перпендикулярному до площини тріщини (уздовж осі Oy), для гранично-рівноважного стану зразка зі сталі 08kp з центральною тріщиною за одновісного розтягу. Деформацію $\varepsilon_{yi}(x, y) = \varepsilon_i$ в околі вершини тріщини визначали (рис. 2) як відношення приросту переміщень Δb_i уздовж осі Oy до бази вимірювання b_i залежно від діючих зусиль p ($\varepsilon_i = \Delta b_i/b_i$). Аналогічний розподіл де-

формацій встановлювали і для двовісного розтягу за різного співвідношення прикладених зусиль χ ($\chi = q/p$; q, p – напруження розтягу, паралельні і перпендикулярні площині тріщини, $\chi = 0,4$).

Аналізуючи експериментальні результати (рис. 2), можна відзначити ось що. На графіках зміни деформацій у зоні передруйнування (l_p , рис. 1а, б) для двох видів навантаження існує деяка відстань l_e^* (рис. 2) від вершини тріщини, на якій деформації залежать від бази вимірювань, а поза нею для різних баз вимірювання вздовж зони передруйнування ($x > l_p$) відрізняються незначно, тобто практично їх можна вважати однаковими. Експериментальне визначення характеристики δ_c пов'язане з певними методологічними труднощами, зокрема, вона залежить від бази вимірювання деформацій у зоні передруйнування. Незалежно від бази (b_i) вимірювання деформацій у зоні передруйнування методом ЦКСЗ довжина цієї зони l_{p*} є стала для даного матеріалу, якщо $p = p_*$.

Зіставлення експериментальних і теоретичних результатів. Для пластини з центральною тріщиною з розв'язку пружно-пластичної задачі про її гранично-рівноважний стан згідно з δ_c -моделлю [1] встановлено таку залежність між довжиною пластичної зони l_{p*} і величиною p_* :

$$l_{p*} = l_0[\sec(\pi p_* / 2\sigma_0) - 1], \quad (1)$$

де l_0 – початкова півдовжина тріщини.

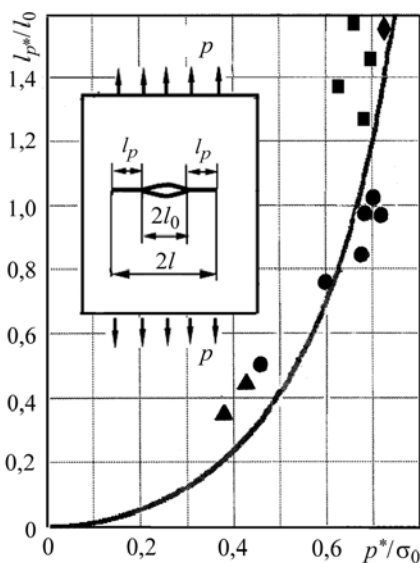


Рис. 3. Залежність довжини пластичної зони від квазістатичного навантаження для сплаву Д16АТ (●); сталей 08кп (■); 65Г (▲); 09Г2С (◆); суцільна лінія – результати, обчислені за ф-лою (1); точки – експеримент ($\sigma_0 = (\sigma_{ys} + \sigma_i)/2$).

Fig. 3. Dependence of the plastic zone l_p size under static fracture for materials: Д16АТ alloy (●); steels 08кп (■); 65Г (▲); 09Г2С (◆); solid line – by Eq. (1); dots – experiment ($\sigma_0 = (\sigma_{ys} + \sigma_i)/2$).

Довжину пластичної зони l_{p*} перед тріщиною вздовж осі Ox підраховували за формулою (1), а також визначали експериментально методом ЦКСЗ. За напруження зчеплення σ_0 брали усереднене значення між напруженнями текучості σ_{ys} і розриву σ_i ($\sigma_0 = (\sigma_{ys} + \sigma_i)/2$), а за відомими методиками загальну деформацію ε розраховували як суму пружної ε_e і пластичної ε_p компонент, тобто $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$. Для більшості матеріалів вважають, що максимальне значення $\varepsilon_e \approx 0,05\%$ [8]. Під час навантаження пластини матеріал у зоні передруйнування zdeформований за границю текучості σ_{ys} . Лінія, що обмежує ділянку матеріалу біля вершини тріщини, де пластична деформація $\varepsilon_p = 0,2\%$, відповідає межі пластичної зони. Тому за довжину пластичної зони приймали довжину відрізка від вершини тріщини вздовж осі Ox до точки, де загальна деформація $\varepsilon = 0,25\%$, і отримали добру узгодженість теоретичних і експериментальних результатів (рис. 3).

Можна вважати, що величина l_{p_*} є характеристикою матеріалу, яка не залежить від бази вимірювання переміщень (рис. 2а) на противагу критичному розкриттю між берегами тріщини (δ_c) біля її вершини, на яке за прямого вимірювання може впливати також і характер формування вершини вихідної тріщини ($2l_0$) під час підготовки зразків для досліджень. Тому на практиці доцільно визначати параметр δ_c як усереднену деформаційну характеристику тріщиностійкості конструкційного матеріалу $\tilde{\delta}_c$ через величину l_{p_*} , яка не залежить від бази вимірювання.

Згідно з δ_c -моделлю [1] маємо формулу

$$\delta_c \approx \frac{8l_0\sigma_0}{\pi E} \ln \left(\cos \frac{\pi p_*}{2\sigma_0} \right). \quad (2)$$

Звідси для визначення граничного зусилля $p = p_*$, коли задана півдовжина тріщини l_0 , одержали:

$$p_* = \frac{2}{\pi} \sigma_0 \arccos \left(e^{-l_{p_*}/l_0} \right), \quad \text{де} \quad l_{p_*} = \pi E \tilde{\delta}_c / (8\sigma_0). \quad (3)$$

Для автомодельної тріщини ($l_{p_*} \ll l_0$) формули (1) і (2) можна спростити, врахувавши, що $p_* < \sigma_0$, $\cos \frac{\pi p_*}{2\sigma_0} < 1$. Розписавши функції у формулах (1)–(3) у вигляді розкладів за малими параметрами і залишивши тільки перші доданки, одержимо:

$$\tilde{\delta}_c = \frac{8\sigma_0 \cdot l_{p_*}}{\pi E}, \quad (4)$$

де E – модуль Юнга матеріалу.

Встановлено (табл. 2), що експериментальні значення δ_c і розраховані $\tilde{\delta}_c$ за формулою (4) корелюють задовільно.

Таблиця 2. Критичне розкриття тріщини за одновісного розтягу пластини з центральною тріщиною

Матеріал	$2l_0$, mm	p_* , МПа	l_{p_*} , mm	δ_c , mm	
				розрахунок за ф-лою (4)	експеримент (тензометричне вимірювання, $b = 1,5$ mm)
08кп	25	250	30	0,196	0,250
09Г2С	25	236	20	0,121	0,140
65Г	25	258	4,5	0,058	0,080
Д16АТ	51	140	12	0,177	0,130
	29	210	12,6	0,181	0,122
	25	180	10,6	0,152	0,108

Вплив двовісності навантажень на статичну тріщиностійкість. Щоб вивчити вплив розтягу пластини у двох взаємно-перпендикулярних напрямках напруженнями p і q на величину $\tilde{\delta}_c$, виконали спеціальні експерименти (рис. 4). Вимірювали довжину пластичної зони l_{p_*} залежно від співвідношення q/p_* . виявили, що за наявності напружень q величина l_{p_*} зменшується, тобто цю залежність можна описати функцією

$$l_{p*}(p_*, q) = a_1 + a_2 \frac{q}{p_*} + a_3 \left(\frac{q}{p_*} \right)^2, \quad (5)$$

де $a_1 = 29,41$ mm; $a_2 = 30,07$; $a_3 = 12,88$ mm – коефіцієнти апроксимації, визначені за експериментальними результатами (рис. 4). Під час двовісного навантаження для знаходження критичного розкриття вершини тріщини $\tilde{\delta}_c^q$ можна використати залежності (4) і (5).

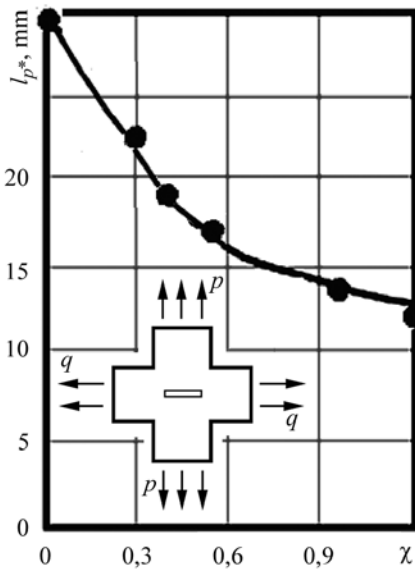


Рис. 4. Вплив жорсткості двовісного навантаження (χ) на довжину пластичної зони l_{p*} .

Fig. 4. The influence of biaxial loading (χ) rigidity on the plastic zone l_{p*} length on the crack length extension.

У табл. 3 наведено розрахункові та експериментальні значення величин δ_c , $\tilde{\delta}_c^q$ для сталі 08кп, визначені за силовою схемою двовісного розтягу хрестоподібного зразка з центральною тріщиною. Результати прямого вимірювання переміщень берегів тріщини біля її вершини за методом ЦКСЗ свідчать, що зі збільшенням співвідношення прикладених зусиль ($\chi = q/p$) від 0 до 1,2 розмір пластичної зони l_{p*} на продовженні тріщини зменшується у 2,5 рази (рис. 4), а розрахункові значення $\tilde{\delta}_c^q$ добре корелюють із вимірними методом ЦКСЗ.

Таблиця 3. Критичне розкриття тріщини за різної жорсткості двовісного навантаження для сталі 08кп

q/p_*	l_{p*} , mm	$\tilde{\delta}_c^q$, mm (розрахунок за ф-люю(4))	δ_c , mm (експериментальні дані за методом ЦКСЗ)
0	29	0,249	0,250
0,3	23	0,242	0,243
0,4	19	0,224	0,224
0,5	17	0,218	0,219
0,95	13	0,211	0,212
1,2	12	0,180	0,181

ВИСНОВКИ

Розроблено методику визначення розподілу деформацій біля вершини тріщини в зоні передруйнування методом ЦКСЗ та розраховано довжину пластичної зони і критичне розкриття тріщини за одно- та двовісного розтягів зразків з центральною тріщиною. Отримано задовільну збіжність значень цих величини, визначених експериментально і розрахунково. Виявлено зону біля вершини тріщини (l_ϵ), у якій пластичні деформації залежать від бази вимірювань, а загальна довжи-

на пластичної зони передруйнування не залежить і може бути параметром для оцінювання деформаційної тріщиностійкості матеріалів.

РЕЗЮМЕ. Предложена методика определения деформации, длины пластической зоны и раскрытия трещины возле ее вершины с помощью метода цифровой спекл-корреляции и тензометрии при одно- и двухосном растяжении пластины с центральной трещиной. Экспериментально установлено, что размер пластической зоны возле вершины трещины постоянный для данного материала (не зависит от базы измерения), но изменяется с переходом к двухосному нагружению. На основании решения упругопластической задачи о предельно-равновесном состоянии пластины с трещиной в рамках δ_c -модели получена формула для определения усредненного значения трещиностойкости материала ($\tilde{\delta}_c$) и длины пластической зоны (l_{p*}). Оценено влияние двухосного нагружения на размер этой зоны.

SUMMARY. A method for determining the deformation value, plastic zone size and crack tip opening displacement, using the method of numerical speckl-correlation and strain measurement under uniaxial and biaxial tension of a plate with a central crack is proposed. It is established experimentally that plastic zone size near the crack type for the given material is independent of the measuring base but changes with the transition to biaxial loading. Based on the solution of the elasto-plastic problem about its limiting-equilibrium state within the δ_c -model a formula for evaluation of an average value of deformation crack growth resistance of materials ($\tilde{\delta}_c$), plastic zone size (l_{p*}) has been derived. The influence of biaxial loading on the plastic zone size is estimated.

1. *Panasyuk V. V.* Strength and Fracture of Solids with Cracks. National Academy of Sciences of Ukraine, Karpenko Physico-mechanical Institute. – Lviv, 2002. – 468 p.
2. *ГОСТ 25.506-85.* Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 62 с.
3. *Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Ковчик С. Е.* Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов. – К.: Наук, думка, 1977. – 277 с.
4. *BSI-DD19: Methods for Crack Opening Displacement (COD) Testing.* – British Standard Institution, 1978. – 64 p.
5. *Панасюк В. В.* Механика квазихрупкого разрушения материалов. – К.: Наук, думка, 1991. – 416 с.
6. *Панасюк В. В., Іваницький Я. Л., Максименко О. П.* Аналіз пружно-пластичного деформування матеріалу зони передруйнування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – **40**, № 5. – С. 67–72.
(*Panasyuk V. V., Ivanyts'kyi Ya. L., and Maksymenko O. P.* Analysis of the Elastoplastic Deformation of the Material in the Process Zone // Materials Science. – 2004. – **40**, № 5. – P. 648–655).
7. *Визначення характеристик тріщиностійкості матеріалів під двовісним навантаженням / Я. Л. Іваницький, С. Т. Штаюра, Р. Б. Костів та ін. // Машинознавство. – 2004. – № 7. – С. 31–34.*
8. *ГОСТ 1497-84.* Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 65 с.
9. *Digital speckle-displacement measurement using a complex spectrum method / D. J. Chen, F. P. Chiang, Y. S. Tan, and H. S. Don // Appl. Opt. – 1993. – 32 (11). – P. 1839–1849.*
10. *Муравський Л. І., Максименко О. П., Сахарук О. М.* Оцінка поперечних зсувів поверхні матеріалу методами спекл-кореляції // Відбір і обробка інформації. – 2003. – Вип. 18. – С. 95–99.
11. *Vijaya Kumar B. V. K. and Haseebrook L.* Performance measures for correlation filters // Appl. Opt. – 1990. – **29**, № 20. – P. 2997–3006.

Одержано 25.07.2011