

УДК 528.721.287: 670.191.33

Є. Ріпецький¹, канд. техн. наук; Т. Рибак², докт. техн. наук;
О. Іванчук³, канд. техн. наук

¹Інститут управління природними ресурсами (м. Коломия)

²Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

³Національний університет «Львівська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ РОЗВИТКУ ВТОМНИХ ТРІЩИН МЕТАЛУ НА ОСНОВІ ЦИФРОВОЇ 3D-МОДЕЛІ

Резюме. Отримано цифрову 3D-модель тріщини (ЦМТ) металу у вигляді поверхні в просторі. При розробленні ЦМТ використано стереопари знімків, які отримано за допомогою растрового електронного мікроскопа. За результатами обробки двох знімків стереопари визначено координати одиничних точок у просторі на поверхні тріщини. ЦМТ утворена шляхом інтерполяції точкових даних із використанням програмного забезпечення Surfer 10. Здійснено аналіз тріщини з використанням ЦМТ і визначено геометричні розміри фронту тріщини у її поперечному перерізі.

Ключові слова: тріщина, коефіцієнт інтенсивності напружень, стереопара, цифрова модель, растровий електронний мікроскоп, поверхня.

Е. Ripetskyu, Т. Rybak, О. Ivanchuk,

RESEARCH OF THE METAL FATIGUE CRACK DEVELOPMENT KINETICS BASING ON DIGITAL 3D MODEL

Summary. The paper presents a new approach to obtain data on geometrical parameters of fatigue cracks, which are crucial in kinetics research of their development. The subject of research was fatigue cracks of the metallic samples. Cracks were formed by testing of samples with the artificial defects on the investigation equipment applying different number of loading cycles. Technology of obtaining digital 3D model crack (DMC) of metal crack is described. Treating the fatigue crack as a fracture surface in metal, photogrammetry methods were applied to create digital 3D model of the crack. Stereo pair images, which had been obtained by means of REM 6I raster electron microscope, were used while developing DMC. According to the results of processing two stereo pair images coordinates of single points in space on the crack surface were determined. DMC was formed by interpolation of point data taking advantage of software Surfer 10.

DMC was presented as the graphic three-dimensional image of crack surface in a vector form. Obtained DMC can be considered under various angles, analyzed with special calculation software modules.

Analysis of the crack was made with application of DMC. Geometric dimensions of the crack front in its cross-section were determined. Obtained cross-section of the crack allows to approximate its front line and to choose reasonably the typical shape of the crack.

Besides, in the case of complex configuration of crack shape the obtained data on its cross section can be used to calculate stress intensity factor (SIF).

It is shown, that in the crack cross section the front of its propagation is a line of complex configuration forming sharp rim of the tunnel shape. Penetration of the crack inside the metal increases the value of stress intensity factor (SIF) by 20 – 40% especially on the final stages of the crack growth. The obtained results are recommended to be used while determining stress intensity factor of cracks with complex configuration.

Key words: crack, stress intensity factor, stereo-pair, digital model, raster electron microscope, surface.

Постановка проблеми. Сучасні методи розрахунку несучих конструкцій на ресурс виходять з принципів наявності в їх елементах втомних тріщин. Процедура передбачає розрахунок коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) і базується на положеннях механіки втомного руйнування [1, 2]. Розвиток втомної тріщини зменшує несучу здатність і може викликати раптове катастрофічне руйнування конструкції.

Наявні матеріали теоретичних та експериментальних даних дозволили систематизувати розрахункові формули визначення КІН для великої кількості взірців з різними типами тріщин: прямолінійних, дископодібних, кільцевих, напівеліптичних та ін. [3]. Тобто розрахункові формул КІН залежать від форми поперечного профілю тріщини шляхом ерахування її геометричних параметрів. На жаль, серед цих параметрів є не тільки розміри зовнішні, заміри яких не викликають проблем, але й внутрішні, які недоступні безпосередньо заміру, бо відносяться до глибин тріщини. Для користування наведеними формулами необхідно встановити зв'язок між зовнішніми лінійними розмірами, які доступні до візуального спостереження, та її внутрішніми, які можуть бути отримані виключно методом дефектоскопії, але використовуються методикою при визначенні КІН тріщини. Тому дана стаття присвячена питанню моделювання втомної тріщини в задачах дослідження кінетики її розвитку. При розв'язуванні цієї задачі постає питання точних вимірів геометричних параметрів тріщини як на макро-, так і макрорівнях, результати яких можуть бути реалізовані при розробленні цифрової моделі тріщини (ЦМТ).

Аналіз досліджень і публікацій. Основна задача при моделюванні тріщин – це отримання точних теоретичних та експериментальних даних про конфігурацію і геометрію тріщини в елементах конструкції. Поширене в сучасних дослідженнях математичне моделювання тріщини ґрунтується на фундаментальних працях Андрійкова О.С., Панасюка В.В., Іванової В.С., Рибака Т.І., Черепанова Г.А. [4, 5, 6, 7, 8]. Отримані авторами аналітичні залежності геометричних параметрів тріщини перевірялись експериментальним методом за допомогою оптичних мікроскопів і в подальшому використовувалися для розрахунку тріщиностійкості конструкцій. Побудова цифрової 3D-моделі тріщини ґрунтується на вдосконаленні методів експериментального дослідження тріщин. У цьому напрямку слід відзначити роботу [9], в якій автори здійснювали спостереження за розвитком тріщини за допомогою комп'ютерних знімків у різні проміжки часу. А для визначення геометричних розмірів тріщини на поверхні металу автори застосовували вимірювальну сітку. Цінним у даній роботі є і те, що дослідження тріщин проводилися з використанням растрового електронного мікроскопа РЕМ-6И.

Комп'ютерні моделі тріщин і принципи їх побудови описано в дослідженнях [10]. Показано особливості моделювання тріщин у випадках, коли досліджуються області навколо її кромки, а коли – її ціла лінія фронту. Розрахункові моделі тріщин побудовані за методом кінцевих елементів і дозволяють отримати картину розподілу напружень навколо тріщини.

Методи побудови цифрових стереомоделей найбільш розвинено у працях Дорожинського О.Л. [11] і успішно використовуються для подання земної поверхні у 3D- картографуванні. Ці методи відносяться до фотограмметричних і ґрунтуються на обробці двох знімків, які називають стереопарами, і які отримані з літаючого апарата з двох різних його позицій. Комп'ютерна обробка стереопар здійснюється на спеціальному фотограмметричному обладнанні, наприклад, станції «Дельта», яка через спеціальні додаткові візуальні пристрої дозволяє побачити об'ємні зображення предметів, які є на стереопарах. Програмна обробка стереопар передбачає для пари площинних координат як лівого знімка X_l , U_l , так і правого X_n , U_n розрахувати вертикальну координату Z поверхні рельєфу.

Розглядаючи втомну тріщину як поверхню зламу у металі, до неї також можуть бути застосовані методи фотограмметрії для створення її цифрової 3D-моделі. Отримання стереопар здійснюється за допомогою растрового електронного мікроскопа, а самі знімки називають РЕМ-зображенням. Особливості методики опрацювання РЕМ-зображень із використанням тест-сітки розкрито в роботі [12].

Мета роботи. Отримати на дослідних взірцях втомні тріщини і розробити для них

цифрову 3D-модель на основі їх РЕМ-знімків, оброблення яких здійснити методами фотограмметрії, а також на основі аналізу отриманої ЦМТ визначити характер розвитку фронту тріщини та встановити її геометричні параметрами, які є визначальними при знаходженні КІН.

Постановка завдання. Для виконання поставленої мети необхідно виконати ряд послідовних завдань, які у статті сформульовано у вигляді технології створення цифрової 3D моделі тріщини та методів її аналізу. Вирішення задачі здійснюється у наступній послідовності: отримати втомні тріщини під дією циклічного навантаження на випробувальному стенді; провести дослідження тріщин на растровому мікроскопі РЕМ-6И з отриманням комп'ютерних зображень тріщини у вигляді стереопар; здійснити обробку стереопар РЕМ-зображень і отримати набір точкових даних у вигляді координат X, Y, Z , які задають поверхню тріщини у просторі; використовуючи програмне забезпечення отримати ЦМТ шляхом інтерполяції попередньо отриманих точкових даних; провести аналіз ЦМТ і визначити геометричні параметри розвитку фронту тріщини у металі.

Результати дослідження. Характерними параметрами тріщини є довжина тріщини по поверхні металу $a_{лв}, a_{пр}$, а також глибина її заходження у середину металу b . Власне, ці величини є характерними в задачах для визначення кінетики розвитку тріщини у металі. І як відзначалося в роботі [7], розв'язок цих задач значно спрощується, якщо попередньо відома траєкторія руху тріщини, яка виступає у вигляді фронту – лінії впадини. Так як фронт тріщини скритий у середині металу і недоступний до візуального сприйняття, то власне ЦМТ повинна стати ефективним інструментом у дослідженні геометричних параметрів втомних тріщин.

Об'єктом дослідження виступали призматичні зразки з бічним надрізом зі сталі Ст5пс. Побудову ЦМТ було заплановано здійснити для п'яти взірців після утворення на них втомних тріщин на різних стадіях їх розвитку від циклічного навантаження на випробувальному стенді.

Отримання втомних тріщин здійснювалося на гідропульсаторі з чотириточковим навантаженням взірців згідно зі стандартною методикою випробування на тріщиностійкість. При цьому розвивалося максимальне зусилля 2800 Н з частотою 10 Гц, асиметрія циклу $R=0,25$. Після проведення 8 – 10 тис. циклів на дослідних взірцях від концентратора напружень спостерігався розвиток і поширення тріщини. Перший взірець пробув на стенді 30000 циклів, а кожні наступні – на 12000 циклів більше від попереднього. Спостереження за розвитком тріщини під час випробування здійснювалося візуально за допомогою оптичного мікроскопа. Результати експерименту наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Кінетика розвитку тріщини при циклічному навантаження на стенді

№ взірця	Кількість циклів навантаження	Довжина тріщини в кінці випробування, мм	Максимальне значення КІН, МПа·м ^{1/2} у зоні тріщини	
			Прямолінійна за формулою [3]	З урахуванням криволінійного фронту за даними ЦМТ
1	30000	1,83	16,99	20,40
2	42000	2,32	19,9	22,98
3	54000	3,12	22,6	27,03
4	66000	4,75	27,3	35,86
5	78000	7,88	41,1	63,23

За допомогою рекомендованих формул було підраховано значення КІН (табл. 1) для тріщин прямолінійного типу [3], бо справжній профіль тріщини на даній стадії

дослідження був ще невідомим, так як візуальні дослідження не могли відповісти на питання розвитку фронту тріщини в середину металу.

Тому внутрішні параметри утворених тріщин досліджували на растровому електронному мікроскопі РЕМ-6И, який дозволяє формувати збільшене комп'ютерне зображення досліджуваних об'єктів у знімки растрових форматів з високою роздільною здатністю. Растровий електронний мікроскоп отримує зображення шляхом сканування поверхні тріщини електронним пучком [13], тому за його допомогою можна отримати дані з глибин тріщини, які під оптичним мікроскопом є недоступні. На відміну від фрактологічних досліджень, які спрямовані на вивчення структури металу, використовують максимальні збільшення мікроскопа (1000x-3000x) [9], побудова цифрової моделі відрізнялась отриманням стереопар з розміщенням цілої тріщини у кадрах знімків.

Таблиця 2

Параметри знімків стереопари тріщини взірця №5 при отриманні на растровому електронному мікроскопі РЕМ-6И

Розміри зображення (pcs)	960,00 × 1280,00
Реальні розміри зображення (мм)	253,97 × 338,62
Роздільна здатність зображення (dpi)	96,01
Кут нахилу знімка (градус)	
лівого	0,0
правого	-6,0
Реальне збільшення зображення (крат)	Mx = 42,37, My = 42,37

У зв'язку з обмеженим простором камери растрового мікроскопа, де встановлювалися дослідні взірці, було обрано метод їх руйнування. З п'яти взірців, які пройшли різну кількість циклів навантаження, були вирізані частини довжинами 15 – 20 мм із зонами тріщин. При цьому сама тріщина була непошкоджена.

Основним завданням на шляху розроблення ЦМТ при дослідженні на растровому електронному мікроскопі РЕМ-6И було отримати фотографії тріщини у вигляді стереопари – двох знімків з різних позицій (рис. 1) Для отримання зображень зразки з тріщинами фотографувалися під різними кутами нахилу. Ще досягалось поворотом установлювальної платформи в межах кута $-6^{\circ} \dots +6^{\circ}$. Параметри отримання стереопари наведено в таблиці 2.

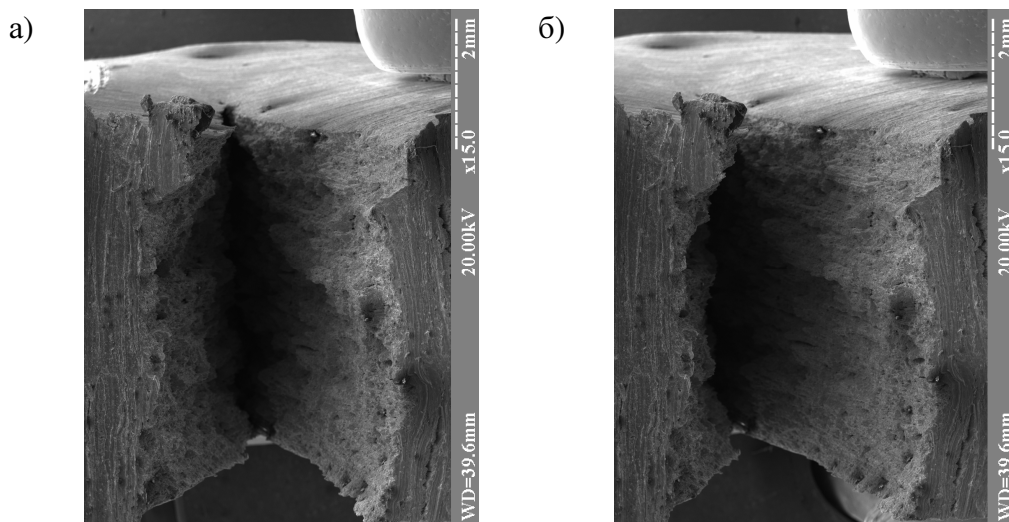


Рисунок 1. Стереопари тріщини металу з кутом нахилу: а) 0 градусів; б) –6 градусів

Figure 1. Stereo-pairs of crack in metal with inclination angle: a) 0 degree; b) –6 degrees

Обробка результатів здійснювалась на фотограмметричній станції «Дельта» методами фотограмметрії з урахуванням особливостей РЕМ-знімків [12]. Спочатку заміри проводилися у площині кожного знімка стереопари. Для точних замірів координат використовувалась тест-сітка. За допомогою тест-сітки вимірювалися координати точок об'єкта як на лівому X_l, Y_l , так і правому X_p, Y_p знімках. Обробка координат здійснювалась з урахуванням спотворень, які є характерними для растрових зображень. Максимальне спотворення по осі X становило 0,1 мм, а по осі Y – 0,5 мм. За даними координат лівого та правого знімків та з урахуванням спотворень обчислювалися значення вертикальної координати Z поверхні тріщини. Процедура була виконана для 425 точок. Приклад розрахунку показано для вибіркового п'яти точок в таблиці 3.

Таблиця 3

Розрахунок координат поверхні тріщини для взірця №5

№	Координати стереопар, мм				Координати ЦМТ, мкм		
	Лівий знімок		Правий знімок		X	Y	Z
	X_l	Y_l	X_p	Y_p			
9	18,088	31,018	17,892	30,779	426,8	732,0	21,96
25	31,208	70,792	36,136	69,865	736,5	254,7	-1151,3
31	42,695	14,782	48,252	13,918	1007,6	348,8	-1307,4
80	90,789	41,677	115,41	38,883	2142,7	983,6	-5672,2
425	0,283	0,325	0,503	0,122	5,62	7,66	-50,03

Для побудови 3D-моделі тріщини було використано значення отриманих координат 425 точок X, Y, Z , які знаходяться на поверхні тріщини металу. Автори запропонували побудувати ЦМТ із використанням програмного забезпечення Surfer 10 [14]. Програма спочатку формує GRID-сітку, тобто розставляє введені точки з відомими значеннями координат у відповідні клітинки. Інші порожні клітинки сітки обчислюють за алгоритмами просторової інтерполяції даних. Таким чином формується поверхня значень у вигляді функції $Z=f(X, Y)$. Реалізовану поверхню тріщини подамо як ЦМТ (рис. 2).

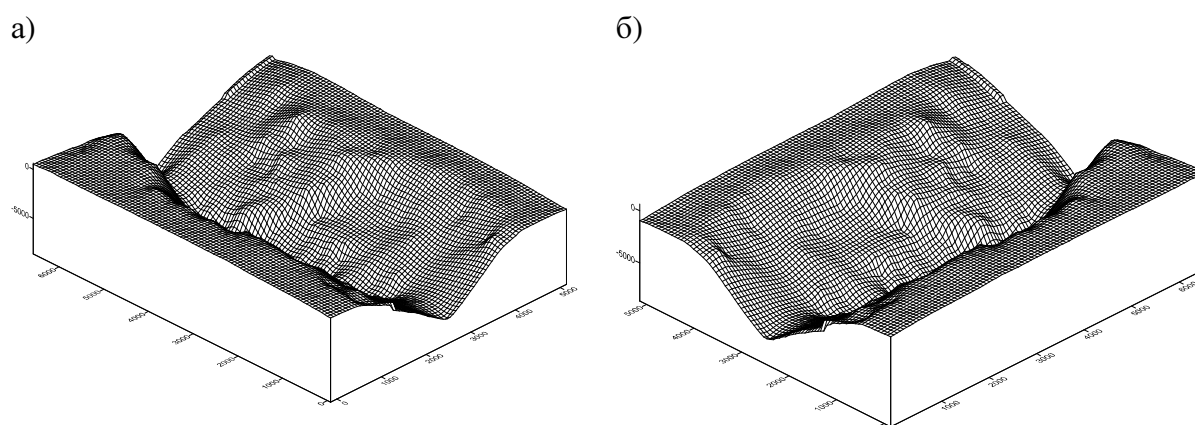


Рисунок 2. Цифрова модель тріщини: а) основний вид, б) повернуто на 90°

Figure 2. Digital model of the crack: a) main view, b) turned in 90°

Отримана ЦМТ є графічне тримірне зображення поверхні тріщини у векторному форматі. Це означає, що поверхню можна розглядати під різними кутами (рис. 2а, б), здійснювати її аналіз, застосовуючи спеціальні розрахункові програмні модулі.

За даними ЦМТ (рис. 2) було визначено форми тріщин усіх взірців і порівняно зі зразком, який прошов найбільшу кількість циклів під час випробування. На кінцевій стадії випробування на бічних поверхнях зразка глибина тріщини становила по лівій грані $a_{\text{лів}}=6195$ мкн, а по правій – $a_{\text{пр}}=6558$ мкн. Лінія впадини фронту тріщини практично перпендикулярна до осі симетрії взірця. Чіткі лінійні контури з обох боків взірця спостерігаються відповідно на довжині 1000 мкн і 1500 мкн від його бічних граней і переходять у воронку з максимальною глибиною $b_{\text{в}}=8583$ мкн. При розходженні берегів нахили можуть бути різні. Кути нахилу лівого берега знаходиться в межах $38^\circ - 44^\circ$, а нахил правого – $29^\circ - 48^\circ$.

На основі ЦМТ отримано поперечний профіль тріщини по фронту її впадини (рис. 3).

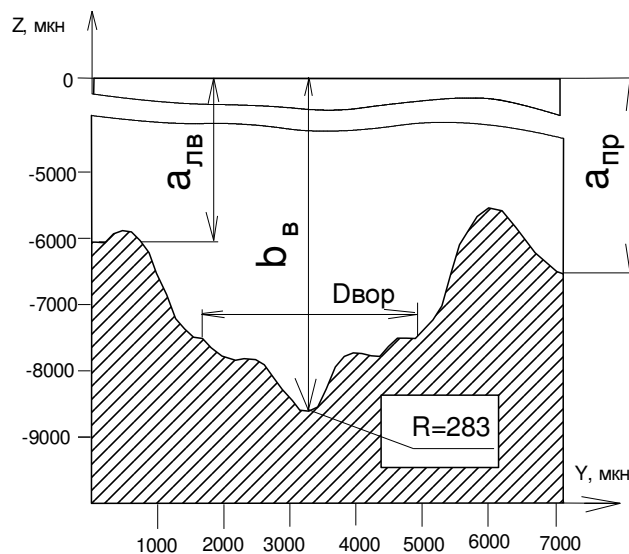


Рисунок 3. Аналіз ЦМТ з отриманням поперечного профілю тріщини

Figure 3. Analysis of DMC with crack cross section

Розглядаючи поперечний профіль даних тріщини, було встановлено для них співвідношення: між a – глибиною тріщини на поверхні і b – глибиною в середину металу у вигляді $b = (1,1 \dots 1,3)a$.

Отриманий поперечний профіль тріщини дозволяє апроксимувати її лінію фронту і підійти обґрунтовано до вибору типової форми тріщини. Крім того, при складних конфігураціях форми тріщини отримані дані про її поперечний профіль можуть використовуватися для розрахунку КІН.

На заключній стадії було здійснено розрахунки КІН для тріщин з криволінійним фронтом за даними ЦМТ. Як бачимо з таблиці 1, наявність входження тріщини у середину металу підвищує значення КІН на 20 – 40%, особливо на кінцевих стадіях зростання тріщини.

Висновки. Показано ефективність технології дослідження геометричних параметрів втомних тріщин з використанням растрового електронного мікроскопа, так як дані отримуються з глибини тріщини, які недоступні звичайним оптичним мікроскопам.

Дані з растрового мікроскопа у вигляді стереопар дозволили розрахувати просторові координати поверхні тріщини, на основі яких розроблена ЦМТ.

Розроблено цифрову модель тріщини металу у вигляді поверхні в просторі з використанням програми Surfer 10. На основі аналізу цифрової моделі встановлено параметри поперечного профілю тріщини у процесі її росту. Показано, що у поперечному профілі тріщини фронтом її поширення є лінія складної конфігурації з утворенням гострої кромки у вигляді воронки. Наявність входження тріщини у середину металу підвищує значення КІН на 20 – 40%, особливо на кінцевих стадіях росту тріщини. Отримані результати рекомендовані для визначення КІН тріщин складних конфігурацій.

Conclusions. Efficiency of technology for the research of geometric parameters of fatigue cracks taking advantage of the raster electronic microscope is described as the data is obtained from the depth of the crack which is impossible by the comental optic microscope.

Data of raster electronic microscope as stereo made possidle allow to calculate the space coordinates of the crack surface, on the basis of which DMC is developed.

Digital model of the metal crack is developed in the form of the surface in space taking advantage of software Surfer 10.

Basing on the digital model analysis the crack cross-section parameters in process of its development are determind. It is shown, that in the crack cross section the front of its propagation is the line of complex configuration forming a rim of tunnel shape. Penetration of the crack inside metal increases the value of stress intensity factor (SIF) by 20 – 40%, especially on the final stages of its development. The obtained results are recommended to be used while determining stress intensity factor of cracks with complex configurations.

Список використаної літератури

1. Партон, В.З. Механика упруго-пластического разрушения [Текст] / В.З. Партон, Е.М. Морозов. – М.: Наука, 1974. – 416 с.
2. Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения [Текст] / Г.П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 640 с
3. Murakami, Y. Stress Intensity Factors Handbook / Y. Murakami. In 2 Volumes. – Oxford etc., Pergamon press. – 1987. XLIX, XXXIX, – 1456 pp.
4. Андрейкив, А.Е. Разрушение квазихрупких тел с трещинами при сложном напряженном состоянии [Текст] / А.Е. Андрейкив. – Київ: Наук. думка, 1992. – 184 с.
5. Иванова, В.С. Разрушение металлов [Текст] / В.С. Иванова. – М.: Металлургия, 1979. – 166 с.
6. Панасюк, В.В. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов [Текст] / В.В. Панасюк, А.Е. Андрейкив, С.Е. Ковчик. – Киев: Наукова думка, 1977. – 247 с.
7. Рибак, Т.І. Пошукове конструювання на базі оптимізації ресурсу мобільних сільськогосподарських машин [Текст] / Т.І. Рибак. – Тернопіль: Збруч, 2003. – 332 с.
8. Черепанов, Г.П. Пластические линии разрыва в конце трещины [Текст] / Г.П. Черепанов // Прикл. математика и механика. – 1976. – Т. 40, № 4. – С. 720 – 728.
9. Оцінка циклічної тріщиностійкості теплостійкої сталі [Текст] / П.В. Ясній, П.О. Марущак, В.Б. Гладь, Р.Т. Бішак, В.Б. Фостик // Збірник наукових статей. – Луцьк: ННВ ЛДТУ, 2007. – Вип. 21. – С. 372 – 380.
10. Hedia, H.S. Three-Dimensional Finite Element Model for Evaluation the Stress Intensity Factors for Different Fracture Modes of Homogeneous Bimaterial / H.S. Hedia, S.M. Aldousari JKAU: Eng. Sci., Vol 18 No. 1, pp: 73– 87 (2007A.D./1428 A.H.)/
11. Дорожинський, О.Л. Фотограмметрія [Текст] / О.Л. Дорожинський, Р. Тукай. – Львів: Вид-во нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2008. – 330 с.
12. Иванчук, О. Структура та функції програмного комплексу «Dimicros» для опрацювання РЕМ-зображень на цифровій фотограмметричній станції [Текст] / О. Иванчук, І. Хрупіт // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів: Вид-во Львівської політехніки. – 2012. – Вип. 1 (23). – С. 191 – 197.
13. Мельник, В.М. Растрово-електронна стереомікрофрактографія: монографія [Текст] / В.М. Мельник, А.В. Шостак. – Луцьк: Вежа, 2009. – 469 с.
14. Surfer. User's Guide. Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers / Golden Software, Inc. Golden, Colorado. – 2002. – 664 с. http://www.wi.zut.edu.pl/gis/Surfer_8_Guide.pdf

Отримано 20.03.2013