

УДК 670.191.33

АВТОМАТИЗОВАНЕ ОЦІНЮВАННЯ ПОШКОДЖЕНОСТІ ПОВЕРХНІ МАГІСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДУ КОРОЗІЙНИМИ ПІТИНГАМИ

І. В. КОНОВАЛЕНКО¹, П. О. МАРУЩАК¹, Р. Т. БИЩАК²

¹ Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя;

² Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Ідентифіковано та кількісно проаналізовано пошкодження поверхні локальної ділянки магістрального газопроводу “Київ–Захід України-1” корозійними пітингами за результатами оброблення цифрових зображень. Форму дефектів оцінено за даними цифрового діагностування та обґрунтовано їх морфологічні ознаки. Встановлено, що окремим етапам пітингової корозії відповідають певні інтегральні параметри зображення. Обробкою даних про геометричні параметри пітингоутворення виявлено основні закономірності коалесценції окремих дефектів та їх формозміни.

Ключові слова: *корозійне пошкодження, пітинг, деградація, пошкодженість поверхні.*

Пітингова корозія – один із найпоширеніших видів локального пошкодження металу [1]. Кордують з утворенням пітингів метали та сплави, експлуатовані в морській воді, атмосферних умовах та ґрунті. Через різноманіття їх форм та стадійності виникнення суттєво ускладнюється поточний контроль об’єктів та прогнозування швидкості корозії [2, 3]. Існує чимало контактних та безконтактних методів діагностування та дефектометрії. Серед оптичних безконтактних достатньо прецизійним, оперативним і водночас простим у реалізації є метод цифрової спекл-кореляції [4], за яким визначають лінійні розміри, площу та розташування пошкоджень і тріщиноподібних дефектів за цифровим зображенням поверхні, забезпечуючи моніторинг процесів зародження та розвитку пітингів у режимі реального часу [5, 6].

В останні роки інтенсивно розвиваються методи вимірювання форми і цифрового діагностування множинних дефектів. Зокрема, способи контролю множинного розтріскування теплотривких сталей, нанопокривів, дорожнього полотна, якості виготовлення друкованих плат тощо [7–10]. Водночас у кожному з цих випадків слід враховувати особливості форми об’єктів аналізу та якість цифрового зображення [11].

Відомі підходи автоматизованого аналізу пітингових пошкоджень прокату алюмінієвих сплавів із обчисленням низки параметрів стану об’єкта, які переконливо довели, що ранні стадії накопичення таких дефектів за корозійного впливу та циклічного навантажування можна ефективно оцінювати за зображеннями їх морфології [12–14]. Цей підхід придатний для прогнозування розвитку тріщин у результаті зародження та росту каверн (пітингів). Доведено, що від стану аналізованої поверхні залежить інформативність зображень.

Нижче створено алгоритм ідентифікації корозійних пошкоджень і розроблено на його основі метод аналізу пітингів різної геометричної форми.

Методика випроб. Досліджували фрагмент магістрального газопроводу “Київ–Захід України-1” після сорока років експлуатації в землі. Газопровід має діаметр 1020 mm з товщиною стінки 10 mm та гумово-бітумний ізоляційний по-

Контактна особа: П. О. МАРУЩАК, e-mail: maruschak.tu.edu@gmail.com

крив. Через порушення ізоляції на зовнішній поверхні труб внаслідок взаємодії металу труби з середовищем виникли корозійні пошкодження у вигляді плям, виразок і каверн різних розмірів і глибини. Під час ремонтних робіт з труби у радіальному та осьовому напрямках на спеціалізованому верстаті Q-80Z (УРМО-80А) з водяним охолодженням вирізали фрагменти, щоб оцінити дефектність металу. Аналізовану поверхню шліфували на верстаті МР-1В.

Класифікація виду пошкодженої поверхні. Під час топологічного обстеження поверхні об'єктів підвищеного технологічного ризику необхідно узагальнити, класифікувати та накопичити інформацію про її стан [15–17]. Корозія суттєво знижує термін експлуатації газопроводів. За якісної ізоляції поверхні трубопроводу у поєднанні із катодним захистом труба кородує досить повільно і рівномірно. Проте через старіння ізоляційної плівки виникають її локальні відшарування і наскрізне руйнування, а отже, локалізуються осередки корозії, які і спричиняють аварії на лінійній частині газопроводів. Для аналізованого фрагмента характерні саме локалізовані корозійні ямки – пітинги [8].

Такі пошкодження властиві ділянкам газопроводу зі зношеним покривом та високими напруженнями (коловими – від робочого тиску та згинальними – від складного рельєфу місцевості) [2]. Під час макроаналізу встановили, що усі пітинги підростали у глибину стінки труби перпендикулярно до її поздовжньої осі, що і було однією із фізико-механічних передумов їх автоматизованого аналізу. Вихідними тут є багатовимірні дані, які описують складний об'єкт, що знаходиться в атрибутивному багатовимірному просторі ознак. Таким чином, однією з найважливіших задач є автоматизований інтегральний аналіз багатовимірних топологічних результатів для їх подальшої числової інтерпретації.

Розрізняють декілька типів пітингів: розпорошені корозійні ямки переважно округлої форми, спричинені впливом середовища; об'єднання суміжних пітингів з утворенням гантелеподібних корозійних ямок внаслідок перетину окремих дефектів; конгломерати пітингів через коалесценцію низки об'єднаних пітингів, що формують розгалужені морфоструктурні утвори значного периметру (рис. 1).

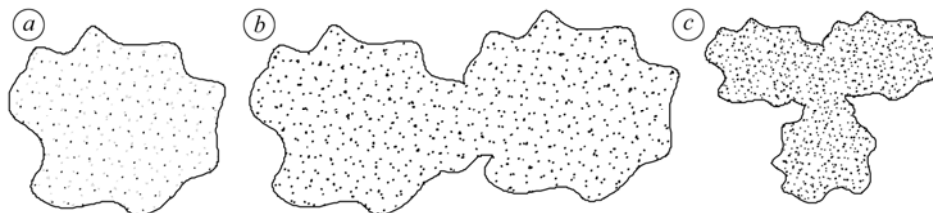


Рис. 1. Схема форм пітингів [14, 15]: *a* – округлі; *b* – видовжені; *c* – розвинуті + об'єднані.

Fig. 1. Pit shapes (schematically) [14, 15]:
a – rounded; *b* – elongated; *c* – developed + consolidated pits.

Формалізація завдань автоматизованої класифікації. Щоб автоматизувати класифікацію пітингів, використали метод аналізу зображень. Вихідне багатоградаційне фотозображення дослідного зразка обробляли згідно з алгоритмом пошуку та розпізнавання пошкоджених фрагментів. У результаті отримали бінарне зображення з локалізованими ділянками пітингів, яке аналізували за інтегральною методикою.

Розташування корозійних ямок визначали, оцінюючи фотозображення досліджуваної поверхні. Вхідне багатоградаційне зображення перетворювали у зображення у градаціях сірого кольору $I_0(x, y)$ (де x – індекс стовпчика, $x \in (1...m)$; y – індекс рядка зображення I_0 , $y \in (1...n)$) (рис. 2а). Алгоритм для ідентифікації пошкод складається з послідовних операцій вирівнювання освітленості, бінарного перетворення, фільтрування та ще одного бінарного перетворення [8, 18].

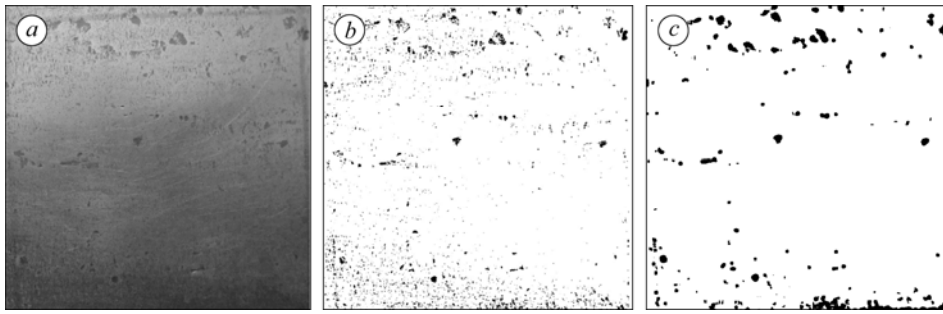


Рис. 2. Вхідне багатотональне зображення I_0 (a), розташування після попередньої бінаризації I_b (b) і результат розпізнавання положення корозійних пітингів I (c).

Fig. 2. Incoming many-tonal image I_0 (a), after previous image binarization I_b (b) and result of recognition of corrosion pits location I (c).

Бінарне перетворення – первинна базова операція виявлення частин зображення, що належать пітингам, і виокремлення їх від фону. Її виконують, порівнюючи яскравість кожної точки зображення з певним граничним значенням. Використовували адаптивний метод бінаризації, за якого границю перетворення обчислюють окремо для кожного фрагмента зображення, що дає можливість послабити вплив завад на його розпізнавання [8].

Вирівнюючи освітленість зображення, позбувалися впливу її нерівномірності під час фотографування зразка на результат роботи алгоритму. Для цього використовували операцію згортки зображення з низькочастотним фільтром з подальшим усуненням низькочастотного складника. Щоб отримати зображення освітленості $I'(x, y)$, застосували гауссовий фільтр з достатньо великим розміром ядра. Зображення з вирівняною освітленістю описували за формулою

$$I_L(x, y) = K_L \cdot \frac{I_0(x, y)}{I'(x, y)}, \quad (1)$$

де $K_L = \max(I'(x, y))$ – коефіцієнт вирівнювання освітленості.

Наступне бінарне перетворення призначене для попереднього розподілу зображення на два кластери: фону та шуканих об'єктів. Зображення I_b містить дрібні шумові утворення, які спотворюють результати діагностування. Тому до нього застосували гауссове фільтрування та повторне бінарне перетворення. Одержане так кінцеве зображення I (рис. 2c) використовували, щоб виявити пошкоджені ділянки зразка. При цьому білі пікселі відповідали фону, чорні – корозійним ямкам. Аналізуючи зображення I , обчислювали відносну площу пошкод, кількість корозійних ямок, їх розмір та координати.

Відносну частку пошкодження визначали як відношення суми площ корозійних ямок до площі дослідженої ділянки:

$$v = \sum_{i=0}^r f_i / S_{\text{surf}}, \quad (2)$$

де $\sum_{i=0}^r f_i$ – сума площ корозійних ямок, ідентифікованих на аналізованому зображенні, pixel.

Здебільш корозійні виразки відрізняються за кольором та інтенсивністю відбитого світла від основної непошкодженої поверхні (вони темніші) (рис. 2). Розпізнавання корозійних утворень контролювали, підбираючи оптимальні параметри алгоритму [18, 19]. Зокрема, під час аналізу зображення на рис. 2a використали значення межі фону 14% та радіуса ядра фільтра 5 пікселів. Для аналізованого фрагмента відносна площа розтріскування $v = 5\%$.

Щоб кількісно описати особливості розподілу корозійних ямок на поверхні зразка, кластеризували зображення I , розбиваючи його на сукупність окремих розпізнаних об'єктів. Кожен з таких об'єктів, оточений зі всіх боків фоном, є окремою корозійною ямкою, або шумовим артефактом, зумовленим особливостями зображення та алгоритмом його обробки. Отже, отримали масив об'єктів, для кожного з яких розраховували площу f_i та координати центра мас об'єкта. Площу f_i обчислювали як загальну кількість всіх пікселів, які формують об'єкт, і за її значенням для кожного об'єкта знаходили еквівалентний діаметр d_i круга з такою ж площею (рис. 3а).

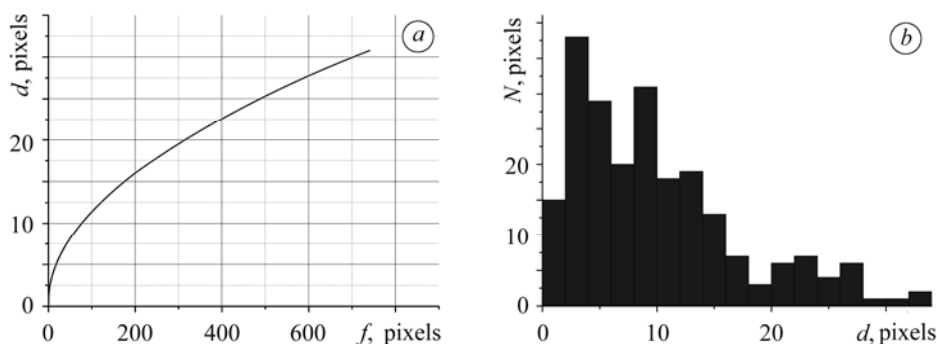
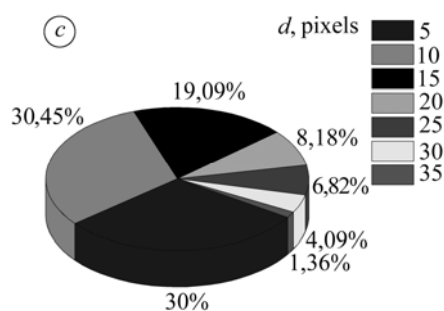


Рис. 3. Графік зміни еквівалентного діаметра для різних площ (а), гістограма розподілу кількості розпізнаних об'єктів за їх еквівалентними діаметрами (б) та відносна частка об'єктів різних діаметрів у їх загальній кількості (с).

Fig. 3. Graph of changes of the equivalent diameter for different areas (a), histogram of distribution of recognized objects by their equivalent diameters (b), and relative part of objects of different diameters in their total number (c).



Виявлено (рис. 3б), що значну частку (60,45%) займають дрібні ямки, середні – 27,27%, великі – 12,28%. Однак дрібні ямки можуть сприйматися як шумові артефакти, що може спричинити деяке завищення кількості розпізнаних пітингів, а збільшення еквівалентного діаметра можуть зумовити індивідуальне зростання розміру пітинга або об'єднання кількох дефектів. В останньому випадку він зростає, проте як умовний параметр лише частково характеризує геометрію дефекту. Для глибшого аналізу структури та морфологічних особливостей дефектів запропонували параметр оцінювання наближення корозійних плям до колової форми.

Врахування форми пітингів. Аналіз фізико-хімічних закономірностей розвитку пітингів виявив, що дослідженому матеріалу притаманний складний розподіл структурно-механічної неоднорідності, яка спричиняє відмінності у швидкості розвитку та злиття корозійних ямок. [12, 20]. Через “злиття” окремих пітингів в об'єднані корозійні утвори змінюється їх геометрія і формується спільний геометричний центр маси дефекту. Тут особливо зацікавлює об'єднання трьох і більше пітингів [13]. Фактично ямкоутворення у першому наближенні можна розглядати як багаторівневу систему, в якій об'єднання пітингів є послідовною еволюцією розмірів і форми дефектів [1]. Відбувається перехід дефектів від колової форми до розвинутої із відповідною їх морфологічною перебудовою.

Щоб виявити ступінь наближення форми корозійних плям до колової, для кожного об'єкта розраховували координати його центра мас $C_i(x_{ci}, y_{ci})$:

$$x_{ci} = \sum_{m=1}^{f_i} x_m / f_i, \quad y_{ci} = \sum_{m=1}^{f_i} y_m / f_i. \quad (3)$$

Далі для розпізнаних об'єктів обчислювали коефіцієнт круглості K_{ci} – відсоток попадання пікселів об'єкта у коло з діаметром d_i , центр якого суміщено з центром мас C_i (рис. 4а):

$$K_{ci} = \frac{\sum_{m=1}^{f_i} g(\bar{r}_m, d_i)}{f_i} \cdot 100\%, \quad g(\bar{r}_m, d_i) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } |\bar{r}_m| \leq d_i / 2, \\ 0, & \text{якщо } |\bar{r}_m| > d_i / 2, \end{cases} \quad (4)$$

де $g(\bar{r}_m, d_i)$ – індикаторна функція оцінювання потрапляння m -го пікселя об'єкта в межі еквівалентного кола з діаметром d_i ; \bar{r}_m – радіус-вектор, направлений від центра еквівалентного кола $C_i(x_{ci}, y_{ci})$ до m -го пікселя об'єкта з координатами x_m, y_m .

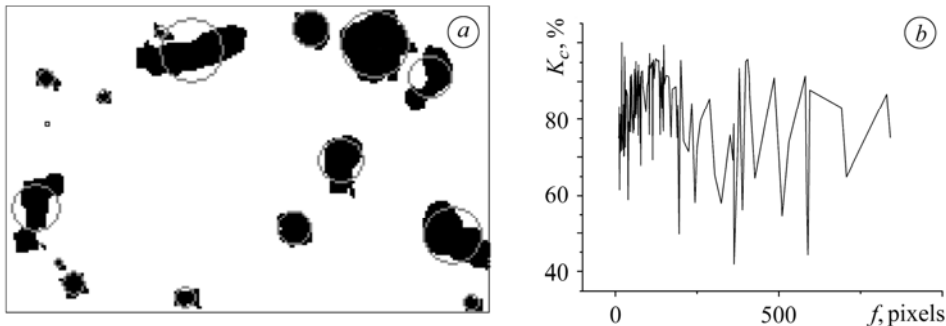


Рис. 4. Розпізнані на зображенні корозійні ямки (збільшений фрагмент рис. 2с) і накладені на них кола з еквівалентною площею (а) та графік зміни коефіцієнта круглості K_c для об'єктів різних площ (б).

Fig. 4. Corrosive pits recognized in the image (magnified fragment of Fig. 2c) and circles with equivalent area imposed on them (a) and graph of variation of the roundness coefficient K_c for objects of different areas (b).

Характер розвитку пошкоджень поверхні визначають за параметрами розташованих на ній пітингів [3]. Для класифікації тріщин інформативним є коефіцієнт круглості K_c . Виявлено, що малі пітинги мають близьку до округлої форму (рис. 4а). Проте за індивідуального підростання та об'єднання зі сусідніми дефектами збільшується розкид їх форм, а тому їх опис параметром K_c не завжди виправданий. Слід відзначити, що запропонований алгоритм все ж таки вдало описує переважну більшість аналізованих пітингів. Подальший їх розвиток та об'єднання свідчить про певну тенденцію до набуття конгломератами округлішої форми, згладжування крайових ефектів та орієнтацію вздовж певного напрямку. Округлі пітинги утворювались на ділянках структурної неоднорідності, зокрема в околі включень, що супроводжувалось накопиченням продуктів корозії внаслідок руйнування матеріалу. Укрупнення пітингів пов'язане насамперед з тривалим впливом корозії, що спричиняє підростання та коалесценцію дефектів з формуванням видовжених пітингів. Пітингам різної форми притаманні не лише геометричні, але й фізико-хімічні особливості, зокрема відмінності в інтенсивності корозійного підростання. Саме тому певні класифікаційні ознаки є основою розуміння механізму накопичення дефектів в аналізованому матеріалі. Особливими цікавими є розвинуті + об'єднані пітинги, які вирізняються складним рельєфом дна і переважно нерівномірні за глибиною. Детальним аналізом встановлено, що

рельєф дна тісно пов'язаний з груповим об'єднанням пітингів, яке пришвидшує деградацію аналізованої поверхні. З одного боку, зменшується “витягнутість” – орієнтація пітинга у певному напрямку, проте зростає морфологічна неоднорідність форми об'єданого пітинга.

Стадійність та параметри множинного розтріскування. Розвиток пітингів неоднорідний з одночасним зародженням нових, що пов'язано з їх вибіркоким підростанням та об'єднанням з більшими дефектами (див. таблицю). Стадійність формозміни пітингів, активація та коалесценція дефектів певною мірою залежать і від деформаційних процесів [15–17]. Зокрема, на макрорівні зародження пітингів пов'язане з локалізацією деформацій і активується зі зростанням макродеформацій та підвищенням напружень у металі труби [21].

Параметри та типи пітингів, виявлених на стінці труби магістрального газопроводу

Еквівалентний діаметр		Відносна кількість, %	Усереднений коефіцієнт округлості K_c	Тип
pixels	μm			
$d_i \leq 10$	$d_i \leq 385$	60,5	85	Округлі
$10 < d_i \leq 20$	$385 < d_i \leq 770$	27,3	70	Видовжені
$20 < d_i$	$770 < d_i$	12,2	75	Розвинуті + об'єдані

Сьогодні актуальним є підвищення ефективності експлуатації газопроводів великого діаметра із вибіркоким ремонтом за результатами діагностичних обстежень внутрішньотрубною дефектоскопією. Це забезпечує безаварійну експлуатацію газопроводу шляхом вибраковування і ремонту окремих ділянок труби. За таких умов для діагностування стану труби та прийняття рішення необхідний експрес-метод оцінювання дефектів, який узагальнює інформацію про пошкодження за сукупністю кількох аналізованих параметрів.

ВИСНОВКИ

Розвинуто автоматизований метод аналізу пошкоджень поверхні корозійними виразками із урахуванням їх морфологічних ознак шляхом оброблення цифрового зображення. За допомогою запропонованого алгоритму розраховано загальну площу пошкодження досліджуваної поверхні, кількість пітингів, їх розмір та координати. Виявлено, що вона здебільш округлої форми, для оцінювання якої введено коефіцієнт округлості. Найбільш колоподібними є малі пітинги розміром до 0,4 mm. Запропоновано метод класифікації пітингів за формою.

РЕЗЮМЕ. Идентифицирована и количественно проанализирована поврежденность магистрального газопровода “Киев–Запад Украины-1” коррозионными питтингами по результатам обработки цифровых изображений поверхности. Поведение дефектов оценено по данным диагностики отдельных этапов их формирования и развития. Установлено, что конкретным стадиям питтинговой коррозии соответствуют определенные интегральные параметры изображения. По результатам обработки геометрических параметров питтингов выявлены основные закономерности коалесценции отдельных дефектов и их формоизменения.

SUMMARY. The identification and quantification of the damage of pipeline “Kyiv–Western Ukraine-1” by corrosion pitting, based on results of the processing of the surface digital images of defects, was carried out. The defects behaviour was assessed by diagnostic of the individual stages of the process of their formation and development. The individual stages of pitting corrosion correspond to the definite integral image parameters. The basic laws of the coalescence of individual defects and their forming based on the processing of data of geometrical parameters of pits were found.

1. Романив О. Н., Никуфорчин Г. Н. Механика коррозионного разрушения конструкционных сплавов. – М.: Металлургия, 1986. – 294 с.
2. Effect of the long-term service of the gas pipeline on the properties of the ferrite-pearlite steel / Н. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsyulnyk et al. // Mat. and Corr. – 2009. – № 9. – P. 716–725.

3. *Похмурський А. Ю.* Діагностика тонколистового прокату, ураженого корозійними пітингами, та визначення їх впливу на міцність: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Львів, 2012. – 16 с.
4. *Influence of deformation process in material at multiple cracking and fragmentation of nano-coating / P. O. Maruschak, S. V. Panin, S. R. Ignatovich et al. // Theor. and Appl. Fract. Mech. – 2012. – 57. – P. 43–48.*
5. *Автоматизований аналіз поверхневих тріщин у конструкційних елементах / П. В. Ясній, П. О. Марушак, І. В. Коноваленко, Р. Т. Біщак // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – 44, № 6. – С. 83–88.*
(*Computer analysis of surface cracks in structural elements / P. V. Yasnii, P. O. Marushchak, I. V. Konovalenko, and R. T. Bishchak // Materials Science. – 2008. – 44, № 6. – P. 833–839.*)
6. *Похмурський А. Ю., Русин Б. П., Обух Ю. В.* Оцінювання впливу пітингоподібних дефектів на міцність тонколистового сплаву Д16Т // Там же. – 2012. – 48, № 1. – С. 95–99.
(*Pokhmurs'kui A. Yu., Rusyn B. P., and Obukh Yu. V.* Evaluation of the influence of pit-like defects on the strength of D16T sheet alloy // *Materials Science. – 2012. – 48, № 1. – P. 101–105.*)
7. *A single precursor pit for pitting corrosion on defect of tinplate alloy layer visualized by atomic force microscopy / G.-F. Cui, J.-H. Wang, N. Li, X.-Q. Huang // Materials Chemistry and Physics. – 2006. – 97 (2–3). – P. 488–493.*
8. *Коноваленко І. В., Марушак П. О.* Автоматизований метод діагностики деформаційного поведіння матеріала, пошкодженого сеткою тріщин термоусталості // Автометрія. – 2013. – 49, № 3. – С. 36–43.
9. *Сиротюк А., Муравський Л., Куць О.* Дослідження мікропошкоджуваності матеріалу та зародження тріщин в околі пітингу методом просторово-часової спекл-кореляції // Машинознавство. – 2008. – № 5 (131). – С. 8–11.
10. *Франкевич Л. Ф., Муравський Л. І.* Дослідження процесів пітингової корозії на поверхні зразка під дією втомного навантаження методом просторово-часової спекл-кореляції // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2009. – № 1 (17). – С. 193–196.
11. *Франкевич Л. Ф.* Кореляційна оцінка корозійних виразок на шорсткій поверхні // Електроніка та інформ. технології. – 2011. – Вип. 1. – С. 149–155.
12. *An image processing method for morphology characterization and pitting corrosion evaluation / E. N. Codaro, R. Z. Nakazato, A. L. Horovistiz et al. // Mater. Sci. and Engng. A. – 2002. – 334 (1–2). – P. 298–306.*
13. *Novel images of the evolution of stress corrosion cracks from corrosion pits / D. A. Horner, B. J. Connolly, S. Zhou et al. // Corr. Sci. – 2011. – 53 (11). – P. 3466–3485.*
14. *Кількісний аналіз структурних змін у сталі внаслідок високотемпературної витримки у водні / О. З. Студент, Б. П. Русин, Б. В. Кисіль та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2003. – 39, № 1. – С. 22–28.*
(*Quantitative analysis of structural changes in steel caused by high-temperature holding in hydrogen / O. Z. Student, B. P. Rusyn, B. V. Kysil' et al. // Materials Science. – 2003. – 39, № 1. – P. 17–24.*)
15. *Environmentally assisted “in-bulk” steel degradation of long term service gas trunkline / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsyurulnyk et al. // Engng. Failure Analysis. – 2010. – 17. – P. 624–632.*
16. *Stress corrosion cracking of the clad structural steels after its high temperature hydrogen degradation / K. Lublinska, O. Tsyurulnyk, M. Hredil et al. // Adv. in Mater. Sci. – 2007. – 7, № 1. – P. 27–32.*
17. *Ясній П. В., Марушак П. О., Біщак Р. Т.* Високотемпературна корозія і розтріскування поверхні елементів металургійного обладнання // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – Спец. вип. № 8. – С. 110–114.
18. *Choi K.Y. and Kim S. S.* Morphological analysis and classification of types of surface corrosion damage by digital image processing // *Corr. Sci. – 2005. – 47 (1). – P. 1–15.*
19. *Konovalenko I. V. and Marushchak P. O.* Error analysis of an algorithm for identifying thermal fatigue cracks // *Optoelectronics, instrumentation and data processing. – 2011. – 47, № 4. – P. 360–367.*
20. *Effect of long term operation on degradation of material of main gas pipeline / P. Maruschak, R. Bishchak, I. Konovalenko et al // Abstr. of the 15th Intern. Symp. on Metallography (April 24–26). – Slovakia: Košice, 2013. – P. 56.*
21. *Неруйнівні методи визначення фізико-механічних характеристик металоконструкцій тривалої експлуатації / М. О. Карпаш, С. Р. Доценко, Н. Л. Тацакович, О. М. Карпаш. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – 309 с.*

Одержано 16.04.2013