

УДК 620.193.16:519.23

УДК 621.391

ОСОБЛИВОСТІ АНАЛІЗУ ПОЧАТКОВОЇ СТАДІЇ КОРОЗІЙНО-ЕРОЗІЙНОГО РУЙНУВАННЯ ВИСОКОМІЦНОЇ СТАЛІ

В. А. ВОЛОШИН, Р. Я. КОСАРЕВИЧ

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

Досліджено початковий етап корозійно-ерозійного руйнування термообробленої сталі ШХ15 у лужному середовищі. Встановлено характер пошкоджень поверхні під час випробувань та закономірності її деградації впродовж інкубаційного періоду кавітації. Також розроблено автоматизовану методику підрахунку поверхневих тріщин, яка дає можливість об'єктивно аналізувати ступінь пошкодження поверхні.

Ключові слова: кавітація, корозійно-ерозійне руйнування, обробка зображень.

Кавітація зумовлює циклічно-ударне навантаження на поверхневий шар металу, частота та інтенсивність якого визначається гідродинамічними умовами та релаксаційними властивостями рідини та металу [1]. Звідси механізм корозійно-ерозійного руйнування (КЕР) в умовах кавітації розглядають як процес зародження та росту тріщин аж до викришування певних об'ємів металу [1–3].

Часто дослідники розрізняють кавітаційне руйнування металу у вигляді кратерів, не акцентуючи увагу на об'єкти менших розмірів. Зазначали [4] утворення в початкові кілька секунд дрібних кратерів діаметром 10 μm , поверхня металу при цьому ставала хвилястою. За подальшого збільшення часу експозиції на поверхні утворювались великі (~150 μm) кратери. Також підкреслювалось, що кратери і раковини випадковим чином розподілені по поверхні, і це не пов'язано з межами зерен чи лініями ковзання.

Особливість КЕР за механізмом тріщиноутворення полягає у відсутності на початковій стадії вагових втрат матеріалу [5], що на перший погляд може свідчити про відсутність проблеми КЕР взагалі. Разом з тим слід мати на увазі, що кавітаційна дія середовища часто супроводжується іншими видами механічного навантаження, які можуть призвести до розвитку магістральної тріщини (втома, корозійна втома, корозійне розтріскування тощо). Тоді зумовлені КЕР мікротріщини слугуватимуть прискоренню такого руйнування, практично без стадії зародження тріщини за механізмами, що відповідають певним видам механічного навантаження [6]. Звідси металографічний аналіз кавітованої поверхні з точки зору мікротріщиноутворення набуває особливої ваги. Мета цієї роботи – розробити методику обробки металографічних зображень кавітованої поверхні оццанолегованої високовуглецевої сталі ШХ15 мартенситної структури, схильної до КЕР саме за механізмом тріщиноутворення.

Матеріали та методи досліджень. Термообробка сталі ШХ15 полягала у гартуванні з температури 980°C у оливу та відпуску при 200°C, що забезпечувало їй високу крихкість та низький опір поверхневому тріщиноутворенню. Кавітаційним середовищем слугував лужний розчин КОН з рН 13,4...13,7, у якому корозійні процеси виражені слабо, тому для досліджуваної системи “метал–середовище” механічний чинник КЕР можна вважати домінуючим.

Експерименти проводили на магнетострикторі УЗДН-1 за частоти 22 kHz та амплітуди його переміщення 25 μm з використанням циліндричних зразків діаметром 12 mm та довжиною 8 mm, які кріпили на торці магнетостриктора. Робочою поверхнею слугувала полірована поверхня торця. Періодично, перериваючи експерименти, на мікроскопі МИМ-8 здійснювали металографічний аналіз кавітованої поверхні, при цьому для спостереження змін за певний період кавітації робочу поверхню зразка позначали мітками за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3.

Автоматизований підрахунок кількісних параметрів тріщиноутворення проводився за допомогою аналізу напівтонових зображень кавітованої поверхні. Щоб виділити тріщини на зображенні, використали підхід на основі методу нарощування початкових областей (НПО) [7]. Запропоновано евристичні критерії вибору початкових точок та приєднання суміжних точок, які базуються на оцінюванні зміни яскравостей в сусідніх точках зображення.

Результати досліджень і обговорення. Змін на поверхні зразка після 5 min кавітаційної дії за амплітуди 25 μm не виявили (рис. 1a), а поодинокі дефекти типу тріщин невеликих розмірів ($\sim 10 \mu\text{m}$) були до випроб і могли з'явитись у результаті гартування високовуглецевої сталі. Проте через 10 min кавітації поверхня зразка помітно пошкоджується (рис. 1b): з'являється велика кількість мікротріщин малих розмірів ($\sim 2 \dots 3 \mu\text{m}$), які однорідно вкривають поверхню зразка. Тріщини розташовані відокремлено, не виказуючи тенденції до об'єднання чи розгалуження. Зі збільшенням експозиції зразка до 20 min виникають локальні потемніння, характерні для корозійно-механічного руйнування та зростає кількість мікротріщин.

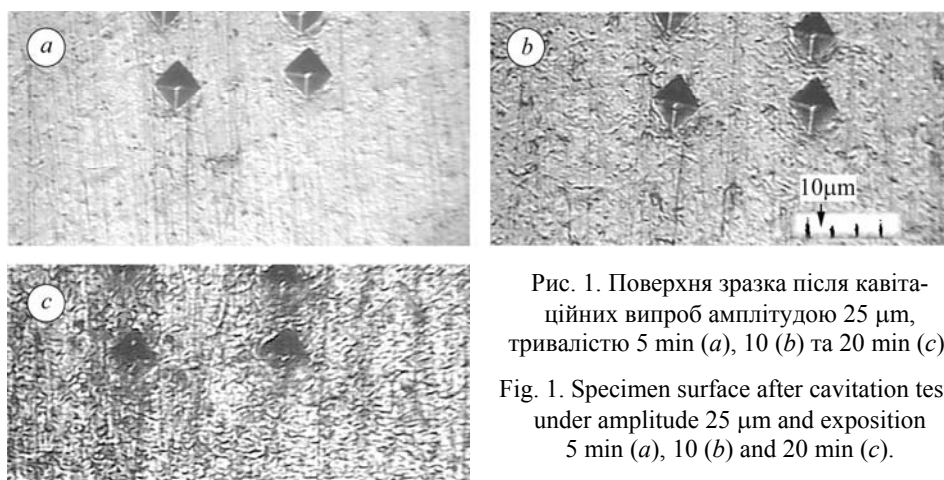


Рис. 1. Поверхня зразка після кавітаційних випроб амплітудою 25 μm , тривалістю 5 min (a), 10 (b) та 20 min (c).

Fig. 1. Specimen surface after cavitation tests under amplitude 25 μm and exposition 5 min (a), 10 (b) and 20 min (c).

Автоматизована обробка зображень поверхні зразків. Сучасні комп'ютерні технології застосовують для кількісної оцінки внеску різних структурних складників та діагностування їх зміни під час деградації матеріалів. До очевидних їх переваг можна віднести скорочення тривалості аналізу та реалізацію зворотного зв'язку між сприйняттям комп'ютерної програми та спеціалістом з матеріалознавства, що суттєво підвищує якість і надійність оцінки структурних змін у металі внаслідок його експлуатації на відповідальних об'єктах енергетики та нафтохімії та зменшує можливість помилкової оцінки. За таких умов на перший план виходять завдання обробки зображень матеріалів для кількісного аналізу поданої інформації [8].

Під час візуальної оцінки поверхні кавітованих зразків треба враховувати можливу неідеальність приготування шліфа, поверхня якого, крім тріщин та пі-

тингів, що виникли під час випроб, містить інші елементи, в першу чергу риси, які мають певну направленість (текстуру). Така текстура не повинна аналізуватися, тобто її розглядають як заваду (фон), що спотворює зображення з тріщинами.

Задачу автоматизованої обробки зображень вирішували, сегментуючи методом НПО цифрове зображення, тобто вирізняючи фон і тріщиноподібні об'єкти. Метод базується на припущенні, що суміжні точки зображення, які належать одній області, мають подібні візуальні характеристики, такі як яскравість, колір, текстуру. Задавши початкові області, кожна з яких на початку складається з однієї точки, за методом НПО до кожної області на основі певного вибраного критерію поступово приєднуються суміжні точки. Кількість початкових областей може визначатися, наприклад, кількістю об'єктів, які потрібно виділити на зображенні.

Коли кількість тріщин на зображенні наперед не відома, початкові точки вибирали, виходячи з їх яскравості, за декілька етапів. Спочатку, враховуючи, що тріщинам відповідають темніші ділянки зображення, вибирали точки, яскравість яких менша за середній рівень по зображенню, і в околі 3×3 яких всі точки мають більшу або таку ж яскравість. Далі відкидали ті, яскравість яких вища за середній рівень відібраних. Крім того, для відбору точок використовувалась різниця значень середніх яскравостей двох різних за розмірами околів O_1 та O_2 , центри яких розташовані в одній і тій ж точці. Якщо різниця цих значень менша за деякий наперед вибраний поріг, то ця точка відкидалася. За поріг вибирали значення дисперсії елементів меншого околу O_2 .

Вибравши початкові точки, необхідно задати критерій приєднання до них інших точок зображення. Запропонований критерій також базується на використанні двох околів різних розмірів. За цим критерієм кожній точці $B(i, j)$ з околу розміром 3×3 початкової точки $A(i, j)$ присвоюється мітка, якщо різниця значень їх яскравостей менша, ніж різниця середніх значень яскравостей двох околів з центром у цій точці

$$m(B(i, j)) = m(A(i, j)) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow |br(B(i, j)) - br(A(i, j))| < C(O_3(B(i, j)), O_4(B(i, j))),$$

де $m(B(i, j))$ – мітка точки $B(i, j)$; $br(B(i, j))$ – яскравість в точці $B(i, j)$. В цьому випадку розмір околів O_3 та O_4 вибирають так, щоб він не перевищував розмір тріщини. Такий критерій дає можливість ефективно відбирати точки, оскільки для тих, що поблизу початкової і належать тріщині, різниця яскравостей невелика, так як і для їх середніх значень в околах O_3 та O_4 . З іншого боку, для точок на краях тріщини різниця їх яскравостей із яскравістю початкової точки збільшується, водночас зростає і різниця середніх значень, оскільки околи містять більше точок із вищою яскравістю. Коли точка не належить тріщині, різниця яскравостей буде більшою за різницю середніх значень в околах, оскільки за межами тріщини ці значення будуть приблизно однаковими для O_3 та O_4 .

Результатом цих двох етапів сегментації є присвоєння міток окремим точкам зображення. Можливий випадок, коли для одного об'єкта визначають декілька початкових точок, що мають різні мітки. Тому наступним кроком є присвоєння всім точкам, що належать одному об'єкту, однакової мітки. Виходимо з того, що тріщина – об'єкт, для елементів якого властива невелика дисперсія яскравостей (критерій НПО). Тому навіть тоді, коли в одного об'єкта є декілька початкових точок, за вибраним критерієм приєднані точки мають формувати зв'язну множину. Отже, вибравши по черзі початкові точки об'єкта і перенумерувавши суміжних сусідів, приєднаних до них, всім точкам об'єкта присвоюємо однакову мітку.

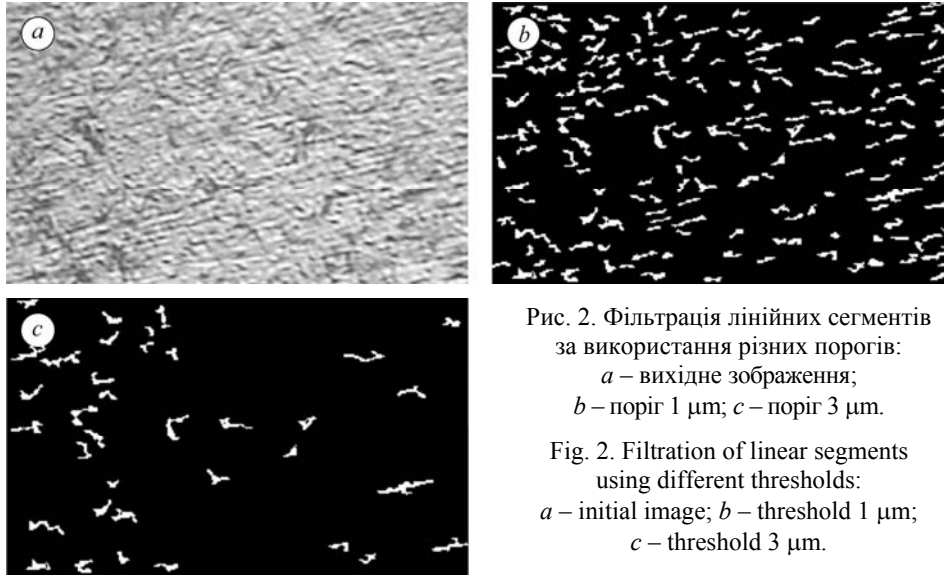


Рис. 2. Фільтрація лінійних сегментів за використання різних порогів:
a – вихідне зображення;
b – поріг 1 μm ; *c* – поріг 3 μm .

Fig. 2. Filtration of linear segments using different thresholds:
a – initial image; *b* – threshold 1 μm ;
c – threshold 3 μm .

Присвоєння однакових міток елементам на основі їх зв'язності дає можливість сформувати множини, які відповідають тріщинам на зображенні. Як вже зазначалось, на зображенні видима також текстура матеріалу після шліфування. Яскравість завад типу текстури дуже близька до яскравості тріщин, а своєю формою вони подібні до прямолінійних сегментів, розташованих під одним кутом для цілого зображення. Оскільки завади спотворюють загальну інформацію про кількість тріщин, їх необхідно вилучити з уже сегментованого зображення. Для цього як критерієм фільтрації скористалися максимальною відстанню між точками множини і прямою, що сполучає дві її найвіддаленіші точки. Якщо максимальна відстань не перевищує заданий поріг, то вважається, що ця множина є

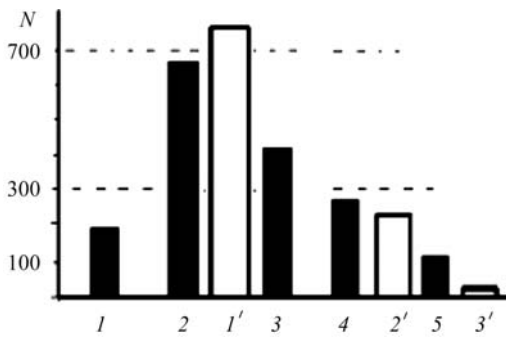


Рис. 3. Порівняння автоматичних (■) та візуальних (□) підрахунків мікротріщин за амплітуди кавітації 25 μm , тривалістю 40 min: *1* – довжина тріщини 1...2 μm ; *2* – 2...3 μm ; *3* – 3...4 μm ; *4* – 4...5 μm ; *5* – 5...6 μm ; *1'* – < 3 μm ; *2'* – 3...5 μm ; *3'* – 5...10 μm .

Fig. 3. Comparison of automatic (■) and visual (□) computation of microcracks; cavitation amplitude 25 μm , duration 40 min: *1* – crack length 1...2 μm ; *2* – 2...3 μm ; *3* – 3...4 μm ; *4* – 4...5 μm ; *5* – 5...6 μm ; *1'* – < 3 μm ; *2'* – 3...5 μm ; *3'* – 5...10 μm .

лінійний сегмент [9]. Важливим є вибір правильного порогу, бо, як легко зауважити з рис. 2, незначна його зміна з 1 μm до 3 μm може відкинути значну кількість об'єктів, які хоч і мають форму близьку до лінійного сегмента, але не є завадами.

Скориставшись цією методикою підрахунків, отримали діаграми розподілу кількості N тріщин залежно від їх довжини L (рис. 3). Для порівняння обох методів на діаграмі наведені результати візуальних підрахунків, отримані на досліджуваних зображеннях. Як бачимо, найбільший внесок у руйнування поверхні зразка роблять мікротріщини довжиною 2...3 μm . При цьому за візуальних підрахунків оцінити внесок вужчих діапазонів довжин тріщин не вдалось, а кількість мікротріщин довжиною до 3 μm

незначно відрізняється від кількості тріщин, отриманої за допомогою автоматичного підрахунку для довжин 2...3 μm . Однак, якщо врахувати два суміжні діапазони автоматично підрахованих мікротріщин до 3 μm , то можна відкоригувати візуальну оцінку їх кількості у бік зростання. Тенденція корекції кількості тріщин у бік зростання збережеться і для тріщин довжиною 3...5 μm і 5...10 μm (рис. 3), тут сума значень автоматичного підрахунку буде більшою, ніж за візуальної оцінки кількості тріщин діапазонів 3...5 μm та 5...10 μm .

Тобто автоматизований підрахунок дає можливість врахувати тріщини менших розмірів, а також чітко розмежувати діапазони підрахунку їх довжини. Водночас більша дискретність відліків для підрахунку дає змогу точніше оцінити динаміку руйнування поверхні, внесок тріщин певної довжини у процес деградації поверхні залежно від тривалості випробувань.

ВИСНОВКИ

Виявлено закономірності початку корозійно-ерозійного руйнування сталі ШХ15. Первинне накопичення пошкоджень деформаційно-механічного характеру супроводжується появою поверхневих мікротріщин та ознак корозійного впливу середовища. Механічна дія кавітаційного навантаження прискорює корозійні процеси на поверхні.

Розроблено методику автоматизованого підрахунку кількості пошкоджень, котра дає можливість об'єктивно проаналізувати зображення поверхні деградованого матеріалу.

РЕЗЮМЕ. Исследовано начальный этап коррозионно-эрозионного разрушения термобработанной стали ШХ15 в щелочной среде. Установлены характер поврежденной поверхности во время испытаний и закономерности ее деградации в течение инкубационного периода кавитации. Также разработана автоматизированная методика подсчета поверхностных микротрещин, которая дает возможность объективно анализировать степень повреждения поверхности.

SUMMARY. The initial stage of corrosion-erosion destruction heat-treated ШХ15 steel in an alkaline environment is studied. The character of the surface damage during testing and regularities of its degradation during the incubation period of cavitations were set. Automated method of surface cracks calculating, which gives an opportunity to analyze the degree of surface damage was also developed.

1. Фомин В. В. Гидроэрозия металлов. – М.: Машиностроение, 1977. – 287 с.
2. Эрозия / Под ред. К. Прис. – М.: Мир, 1982. – 464 с.
3. Пирсол И. Кавитация. – М.: Мир, 1975. – 95 с.
4. Карпенко Г. В. Физико-химическая механика конструкционных материалов. – К.: Наук. думка, 1985. – Т. 1. – 226 с.
5. Басараб А. І. Роль корозійного чинника в процесах корозійно-ерозійного руйнування конструкційних сталей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Львів, 2000. – 19 с.
6. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / Под ред. В. В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1990. – Т. 4. – С. 162–163.
7. Automatic image segmentation by integrating color-edge extraction and seeded region growing / J. Fan, K.Y. Yau, Elmagarmid Ahmed K. et al. // IEEE Trans. on Image Processing. – 2001. – № 10. – P. 1454–1466.
8. Комп'ютерний аналіз характерних елементів фрактографічних зображень / Р. Я. Косаревич, О. З. Студент, Л. М. Свірська та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – 48, № 4. – С. 53–60.
(Computer analysis of characteristic elements of fractographic images / R. Ya. Kosarevych, O. Z. Student, L. M. Svirs'ka et al. // Materials Science. – 2013. – 48, № 4. – P. 474–481.)
9. Teh C. H. and Chin R. T. On the detection of dominant points on digital curves // IEEE Trans. PAMI. – 1989. – № 8. – P. 859–872.

Одержано 23.01.2013