

УДК 620.191.33

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОПОШКОДЖУВАНOSTI МАТЕРІАЛУ ТА ЗАРОДЖЕННЯ ТРИЩИН В ОКОЛІ ПІТИНГУ МЕТОДОМ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ СПЕКЛ-КОРЕЛЯЦІЇ

А. Сиротюк

Канд. техн. наук

Л. Муравський

Професор, д-р техн. наук

О. Куць

Інженер

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

Г аааааіт і аогаеёо іоірааііу і едїїіоетяооааііпоі і аоаоаео да сдгажааііу ооііел а іетел і оелга іа оеелііт ааоїді іааіе і аоаеаае ітааоїі, уеа доіоооіпу іа оаоїіоі ідіпдііаіі-аііаі; ііаеел-елдаеуоі. І аогаеел аа° сї іао іодел оааде ііпеліаііі сїадажааііу еіеаеісїааііі; аеуіеел іааелел і оелгао а даеуііі о аііі да оеодгае оїдіі. Дїсїаеаіа ідіааі іа сїааііа-аііу аа° ііаеелііоу аесїа-еде еііеліі дїсііде ііоеліажааііу е ііааідеоіоааде поааі; ідіоаіо, сї аіпеліаооіпу.

циклічне навантаження, поверхня металу, пітинг, спекл-кореляція, кореляційний пік, тріщина

Оцінка розвитку мікродфектів, як первинних джерел зародження процесів руйнування матеріалу, є важливим компонентом проблеми технічного діагностування відповідальних конструкцій тривалої експлуатації [1]. Одним з таких мікродфектів, що доволі часто зустрічаються на поверхнях елементів конструкцій, є пітинг — заглиблення на поверхні металу, природа якого може бути як механічна (вм'ятини), так і фізико-хімічна (корозія). Пітинги є ефективними концентраторами механічних напружень, які під дією експлуатаційних навантажень спричиняють подальшу мікропошкоджуваність матеріалу в їх околі (зони пластичного деформування та розшарування) і зумовлюють виникнення поверхневих тріщиноподібних дфектів.

Нами запропоновано нову методику для дослідження мікропошкоджуваності матеріалу й зародження тріщин в околі пітингів на циклічно деформованій металевій поверхні, яка ґрунтується на техніці просторово-часової

спекл-кореляції. Ця техніка, яка є подібною до техніки оптико-цифрової кореляції спекл-зображень [2, 3], дає змогу досліджувати тривалий процес пітингової корозії на основі аналізу динаміки зміни інтенсивностей максимумів кореляційних піків. Подібний підхід на основі техніки цифрової спекл-кореляції використовували у працях [4, 5] для дослідження корозійних явищ на поверхні металів.

Сутність запропонованої методики. Методика полягає в наступному: дослідна ділянка поверхні освітлюється когерентним або некогерентним світлом і формуються спекл-зображення, які реєструються цифровою камерою. Далі, вихідне спекл-зображення $r(x, y)$ ділянки поверхні зразка перед початком прикладання циклічних навантажень реєструють цифровою камерою. Записане в компю'тер зображення розбивають на квадратні фрагменти $r_{m,n}(x, y, t)_{t=0}$ однакової площі, де t — час експерименту. Для отримання тестового нормувального

автокореляційного піка здійснюють операцію автокореляції над усіма фрагментами й отримують прямокутну ґратку, розташованих у центрах фрагментів автокореляційних піків, кожен з яких описується розподілом інтенсивності

$$A_{m,n}(x,y,t)|_{t=0} = F^{-1} \left\{ F \left[r_{m,n}(x,y,t)|_{t=0} \right] \times F \left[r_{m,n}(x,y,t)|_{t=0} \right] \right\}.$$

Встановивши інтенсивність нормувальних піків, починають експеримент, прикладаючи циклічне навантаження до зразка із заданою частотою. Після певної кількості циклів, у момент часу $t = t_1$, реєструють наступне спекл-зображення і, здійснюючи над ним такі ж операції, формують прямокутну матрицю фрагментів. Далі здійснюють операцію крос-кореляції між вихідними фрагментами і відповідними фрагментами сформованої матриці й отримують ґратку кореляційних піків, кожен з яких описується таким розподілом інтенсивності:

$$C_{m,n}(x,y,t_1) = F^{-1} \left\{ F \left[r_{m,n}(x,y,t)|_{t=0} \right] F \left[r_{m,n}(x,y,t_1) \right] \right\}.$$

З наступним спекл-зображенням, зареєстрованим у момент часу $t = t_2$ ($t_2 > t_1$), повторюють такі ж операції і отримують наступну ґратку крос-кореляційних піків, кожен з яких описується розподілом інтенсивності

$$C_{m,n}(x,y,t_2) = F^{-1} \left\{ F \left[r_{m,n}(x,y,t)|_{t=0} \right] F \left[r_{m,n}(x,y,t_2) \right] \right\}.$$

Фрагменти $r_{m,n}(x,y,t_1)$ і $r_{m,n}(x,y,t_2)$ спекл-зображень отримують під час проведення експерименту. Якщо на них жодних змін не зафіксовано, то наближено можна вважати, що кореляційні піки розподілів інтенсивності $C_{m,n}(x,y,t_1)$ і $C_{m,n}(x,y,t_2)$ практично не відрізняються від інтенсивності автокореляційного піка, якщо не враховувати впливу шумів та завад. Якщо ж за час $t = t_1$ у фрагменті $r_{m,n}(x,y,t_1)$ з'явилися мікропошкодження, то у цьому випадку інтенсивність кореляційного піка в розподілі інтенсивності $C_{m,n}(x,y,t_1)$ зменшується за рахунок збільшення розбіжностей між фрагментами $r_{m,n}(x,y,t)|_{t=0}$ і $r_{m,n}(x,y,t_1)$. Ще більші розбіжності можуть бути зафіксовані між фрагментами $r_{m,n}(x,y,t)|_{t=0}$ і $r_{m,n}(x,y,t_2)$, що відображається зменшенням кореляційного піка у розподілі $C_{m,n}(x,y,t_2)$ як відносно автокореляційного піка, так і кореляційного піка у розподілі $C_{m,n}(x,y,t_1)$.

Таким чином, під час проведення експерименту з реєстрацією спекл-зображень, а потім для кожної серії фрагментів $r_{m,n}(x,y,t)$ усіх або вибраних спекл-зображень будують часову послідовність кореляційних піків (рис. 7). Зі зростанням кількості циклів навантаження, мікропошкоджуваність в околі пітингу на поверхні зразка збільшується, про що свідчить зменшення інтенсивності кореляційних піків, отриманих у результаті кореляції двох зображень цього ж фрагмента у початковий момент часу $t = 0$ і в момент t_i запису чергового i -го спекл-зображення.

У спекл-зображенні пітинг має вигляд темної (чорної) плями, оскільки на ньому світло не розсіюється. Тому можна вважати, що кореляція між частиною фрагмента $r_{m,n}(x,y,t)|_{t=0}$ вихідного зображення і частиною фрагмента $r_{m,n}(x,y,t_i)$, повністю заповненого дефектом, рівна нулю. Оскільки операція кореляції є лінійною, то зміна інтенсивності кожного i -го піка в сторону його зменшення порівняно з інтенсивністю попереднього $i-1$ -го піка пропорційна збільшенню площі дефектів в i -му фрагменті порівняно з площею дефектів у $i-1$ -му фрагменті. Тому зміну інтенсивностей піків можна прив'язувати до зміни площі дефектів у кожному фрагменті і, аналізуючи інтенсивності піків, здійснювати моніторинг розвитку пітингу.

Установка та експериментальна реалізація методу. Об'єктом дослідження був процес початкової механічної пошкоджуваності матеріалу та подальше зародження і розвиток поверхневих тріщин в околі півсферичних пітингів. Зразки з гладкими полірованими поверхнями і механічно створеними пітингами випробовували під дією циклічного навантаження синусоїдальної форми.

Для експериментального дослідження розвитку пітингової корозії циклічно навантажених зразків методом просторово-часової спекл-кореляції створено установку (рис. 1) на базі випробувальної машини циклічного згину зразків [6].

Установка складається з випробувальної машини циклічного навантаження, на якій закріплено дослідний зразок (див. рис. 1), відеокамеру SONY XCD-SX910, вихідний канал якої через інтерфейс IEEE1394 підключений до персонального комп'ютера, та давач положення і синхронізації, який у певній фазі навантаження випробувальної установки подає на вхід відеокамери імпульс запису зображення і одночасно (через послідовний інтерфейс RS232 комп'ютера) сигнал програми оброблення про наявність події — фіксації зображення в камері.

В установці функції оптичного перетворювача „світлодіод – фотоприймач” виконує фотопереривач ATIR0221DS виробництва корпорації Kingbright. Підсилювач, який виконує функції підсилення сигналу фотоприймача і формування фронтів вихідного імпульсу для роботи TTL мікросхем, виконано на мікросхемі 155ТЛ2. Формувач імпульсу запуску камери виконано на

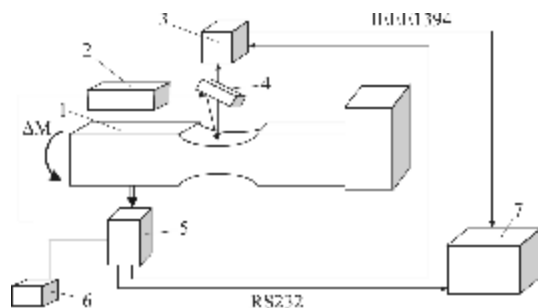


Рис. 1. Блок-схема установки для дослідження розвитку пітингів методом просторово-часової спекл-кореляції: 1 — дослідний зразок; 2 — освітлювач; 3 — камера; 4 — напівпрозоре дзеркало; 5 — давач положення (див. рис. 3); 6 — блок стабілізованого живлення; 7 — комп'ютер

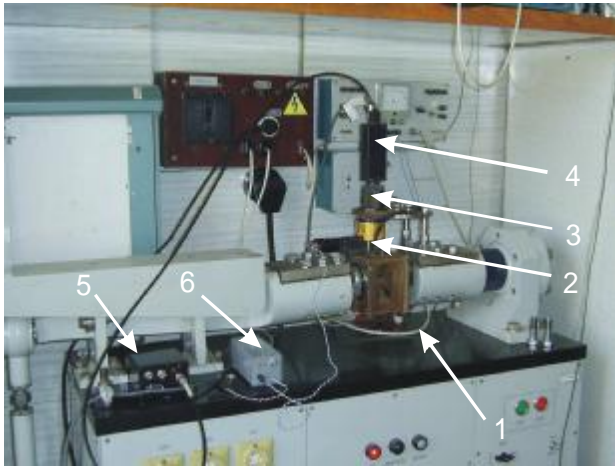


Рис. 2. Загальний вигляд установки: 1 — випробувальна машина циклічного згину; 2 — освітлювач; 3 — вузол оптичних елементів; 4 — камера SONY XCD-SX910; 5 — датчик положення (див. рис. 3); 6 — блок стабілізованого живлення

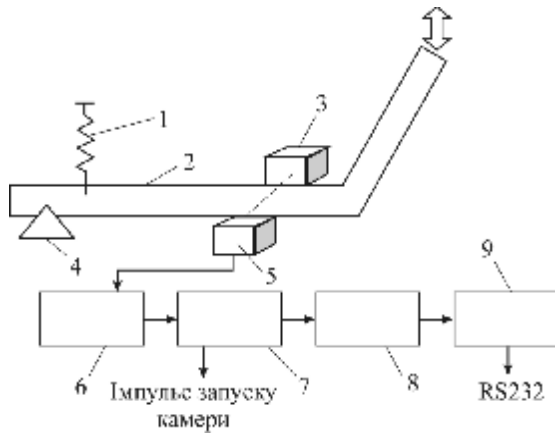


Рис. 3. Блок-схема датчика положення: 1 — пружина; 2 — важіль; 3 — світлодіод; 4 — опора; 5 — фотоприймач; 6 — підсилювач; 7 — формувач імпульсу запуску камери; 8 — мікроконтролер; 9 — формувач рівнів RS232

мікросхемі 155АГ3, яка забезпечує тривалість вихідного імпульсу в межах 10...12 мкс потрібних для запуску камери SONY XCD-SX910 в режимі запису від зовнішньої синхронізації. Для забезпечення обміну даними за протоколом інтерфейсу RS232 використано мікроконтролер AT90S2313 виробництва корпорації Atmel. Формувач рівнів RS232 виконано на мікросхемі MAX232 виробництва корпорації Maxim. В установці функціонує блок живлення, який забезпечує стабілізоване живлення освітлювача для створення стабільної підсвітки дослідного зразка на весь час проведення експерименту, який може тривати до 6...10 діб.

Програмне забезпечення, призначене для оброблення даних, забезпечує обчислення й аналіз кореляційних коефіцієнтів фрагментів двох послідовних зображень, отриманих у різні моменти часу. Програма містить всі стандартні пункти меню, прийняті для програм, що працюють під операційною системою Windows.

Аналіз отриманих даних. Експериментальні дослідження проводили на зразках з нержавіючої сталі 08Х18Н12Т у повітрі (див. рис. 4,а). Зразки випробували під дією циклічного навантаження синусоїдальної форми (частота $f = 0,1$ Гц, коефіцієнт асиметрії $R = 0$). На поверхні концентратора розміщено півсферичне заглиблення діаметром 0,5 мм (див. рис. 4,б), що імітує пітинг.

Після 32×10^3 циклів навантаження було зафіксовано чітко виражену тріщину, і власне з цього моменту проводився аналіз отриманих результатів. На рис. 5 наведено ділянку поверхні, де зміни кореляційних піків найвиразніші. Розмір зображення цієї ділянки, яке вводиться в комп'ютер, становить 1280×960 пікселів. Розмір кожного фрагменту, на які розбивається зображення, становить 32×32 пікселі. Аналізували 9 фрагментів ділянки, в межах яких зароджувалась і поширювалась тріщина (рис. 6).

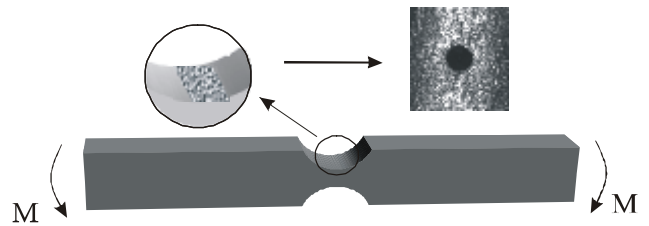


Рис. 4. Зразок для дослідження мікропошкоджуваності матеріалу та зародження тріщин в околі пітингів

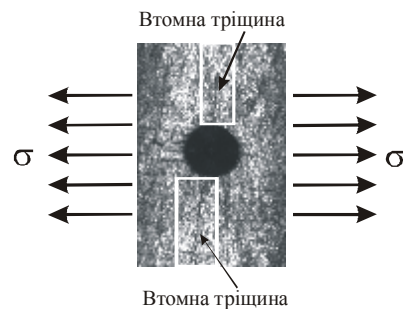


Рис. 5. Тріщини, що зародились поблизу пітингу після 32 тис. циклів навантаження

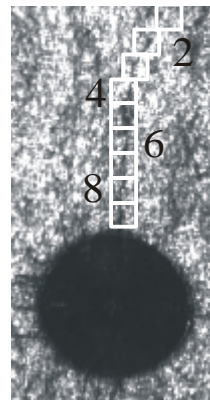


Рис. 6. Фрагменти на ділянці зразка де проводиться оцінка зміни кореляційних максимумів

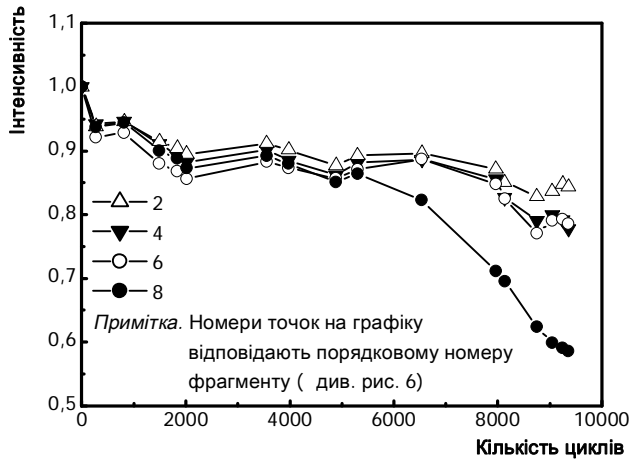


Рис. 7. Залежність зміни інтенсивності кореляційних максимумів фрагментів від кількості циклів навантаження

Наведені експериментальні залежності інтенсивності кореляційного піка від кількості циклів навантаження показують, що найповільніший спад відбувається поблизу вершини вибраної тріщини для найвіддаленіших від концентратора напружень фрагментів (фрагмент 2, рис. 6). Ближче до концентратора напружень спад є інтенсивнішим після приблизно 7000 циклів навантаження, причому їхня поведінка для фрагментів від 3-го до 7-го практично не відрізняється (фрагменти 4 і 6, рис. 6). І, накінець, безпосередньо в околі концентратора напружень на ділянці де розташована основа тріщини (фрагмент 8, рис. 6) спостерігається найбільший інтенсивний спад залежностей після 6000 циклів.

Отримані на основі розробленої методики залежності свідчать про можливість дослідження у реальному часі процесів розвитку пластичних деформацій на циклічно деформованій поверхні матеріалу в околі мікроструктурних концентраторів напружень (включення, порожнини тощо). Крім цього, за допомогою таких залежностей можна реєструвати процес зародження та розвитку фізично коротких втомних тріщин біля пітингів та корозійних виразок, розміри яких сумірні з розмірами структурних елементів матеріалу.

Висновки. Розроблена методика дає змогу фіксувати зображення дослідної поверхні в цифровій формі, а також вимірювати лінійні розміри, площу та розташування існуючих на поверхні пошкоджень і тріщиноподібних дефектів без зупинок експериментального обладнання і в реальному часі.

Точність вимірювання лінійних розмірів складає ± 20 мкм, що дає змогу деталізовано аналізувати всі

кінетичні особливості процесів зародження та розвитку тріщиноподібних дефектів на циклічно деформованій поверхні матеріалу при заданих умовах випробування.

Отримані дані можуть бути використані як зразки при ідентифікації умов руйнування реальних елементів конструкцій чи деталей машин в експлуатаційних умовах.

Література

1. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під заг. ред. В.В. Панасюка. Том 7: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / І.М. Дмитрах, А.Б. Вайнман, М.Г. Стащук, Л. Тот. Під ред. І.М. Дмитраха. — К.: Видавничий дім НАН України „Академперіодика”, 2005. — 378 с.*

2. *Muravsky L.I., Maksymenko O.P., Sakharuk O.M. Use of a joint transform correlator architecture for study of speckle displacements // Opt. Commun. — 15 October 2004. — Vol. 240. — Issues 4—6. — P. 275—291.*

3. *Муравський Л.І., Сахарук А.Н., Максименко А.П. Использование метода оптической спекл-корреляции для изучения процессов разрушения конструкционных материалов // Оптический журнал. — 2004. — Т. 71, №7. — С. 52—57.*

4. *Fricke-Begermann T., Gylker G., Hirsch K.D., Wolff K. Corrosion monitoring with speckle correlation // Appl. Opt. — 1999. — Vol. 38, №28. — P. 5948—5955.*

5. *Hirsch K.D., Fricke-Begermann T., Gylker G., Wolff K. Speckle correlation for the analysis of random processes at rough surfaces // Opt. Las. Eng. — 2000. — Vol. 33, №2. — P. 87—105.*

6. *Сиротюк А.М. Встановлення умов поверхневого тріщиноутворення при циклічному деформуванні сталей енергетичного устаткування у водних середовищах: Автореф. дис... канд. техн. наук: 01.02.04 / Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. — Львів, 2002. — 17 с.*

Отримана 23.05.07

A. Syrotyuk, L. Muravsky, O. Kuts

Study of material micro damaging and crack initiation near pit by method of spatio-temporal speckle-correlation

Karpenko Physico-Mechanical Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv

A new method for the studies of materials micro damaging and further crack initiation in near pit on cyclically deformed metallic surface is proposed on the ground of spatio-temporal speckle-correlation technique. Here, the continual imaging of localised area around pit can be performed in real time and in digital form. Using the developed software a size of damaged zone or nucleated crack length can be determined for any stage of studied process.