

УДК 670.191.33

КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ СІТКИ ТРІЩИН ТЕРМІЧНОЇ ВТОМИ НА ПОВЕРХНІ МАТЕРІАЛУ

П. О. МАРУЩАК¹, І. В. КОНОВАЛЕНКО¹, С. В. ПАНІН²,
П. С. ЛЮБУТИН², Ж. БРЕЗІНОВА³, А. ГУЗАНОВА³, П. Я. СИДОР⁴

¹ Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя;

² Інститут фізики міцності і матеріалознавства Сибірського відділення РАН, Томськ, Росія;

³ Кошицький технічний університет, Словаччина;

⁴ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

За результатами автоматизованого аналізу зображень поверхонь з тріщинами термічної втоми встановлені особливості деформування і руйнування тепло-тривкої сталі 25X1M1Ф. Виявлено та кількісно описано закономірності і характерні етапи її деформування з трансформацією на поверхні блокової структури розтріскування внаслідок об'єднання окремих тріщин термічної втоми в сітку, яку визначає здатність металу деформуватися в межах острівців нерозтріснутого матеріалу, оточених тріщинами. Міру взаємодії кожної з тріщин з їх множиною оцінено за інтенсивністю зсувних та ротаційних процесів всередині блоків матеріалу, непошкоджених тріщинами термічної втоми, та зміною їх орієнтації відносно напряму прикладеного навантаження.

Ключові слова: тріщини термічної втоми, множинні дефекти, деформування, аналіз, діагностування.

Відомі підходи, методи та засоби оцінювання пошкодженості та деформаційної здатності матеріалів із розпорошеними та локалізованими дефектами, що використовують неруйнівний контроль [1–5]. Зокрема, розроблено методологію та оригінальні технічні засоби ідентифікації пошкоджень на поверхні зразка за статичного та циклічного навантажень, алгоритми усунення завад та розпізнавання дефектів різної фізико-механічної природи [2–5]. За розмірами ділянок деформаційної неоднорідності можна будувати карти стану поверхні і прогнозувати зародження тріщиноподібних дефектів у металевих та композитних матеріалах [5].

Водночас однією з проблем, які стримують розвиток таких підходів, залишається складність розпізнання та опису розривів полів переміщень, властивих тріщиноподібним дефектам, а також необхідність інтегрально оцінювати стан окремих сингулярних зон [6]. Подібні завдання актуальні також для матеріалів із множинними дефектами термічної втоми. Ураховуючи структуру та характеристики окремих дефектів, їх взаємне розташування, можна оцінити кінетику пошкодження теплотривких сталей із множинними тріщинами термічної втоми та прогнозувати їх граничний стан [7, 8]. Виявивши умови, що визначають об'єднання множинних дефектів, вдасться підвищити достовірність оцінювання напружено-деформованого стану металургійного та енергетичного обладнання, а також вдосконалити методи опису коалесценції структурно-механічних дефектів [9, 10].

Розроблено [11–13] низку алгоритмів для кількісного опису множинних пошкоджень. Проте для інтегрального аналізу стану матеріалу з розпорошеними і локалізованими дефектами на різних стадіях деформування потрібні подальші до-

слідження. Адже розкриття стадійності та кількісний аналіз пошкоджень у матеріалі під час його деформування є передумовою створення нових підходів оптично-цифрового контролю конструкцій у металургії, авіації та нафтогазовому комплексі [9, 14, 15]. Незважаючи на індивідуальні особливості кінетики накопичення пошкоджень на таких об'єктах, спільною ознакою тут є стадійність процесу, яку можна визначити експериментально та описати у вигляді аналітичних залежностей, або кореляційних функцій.

Нижче проаналізовано еволюцію пошкоженості матеріалу з множинними тріщинами термомеханічної втоми з урахуванням особливостей деформування на різних масштабних рівнях.

Методика досліджень. Призматичні зразки шириною $b = 40 \text{ mm}$ і товщиною $t = 10 \text{ mm}$ (рис. 1) випробовували на сервогідролінійній машині СТМ-100 за одновісного розтягу зі швидкістю деформування $2,6 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$.

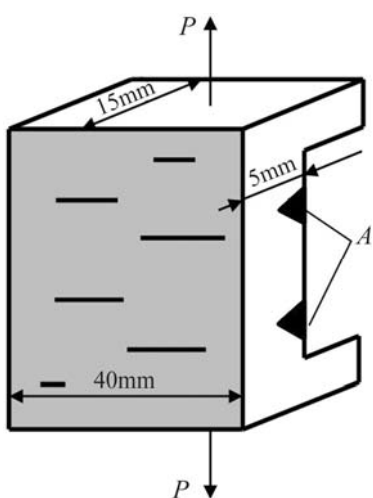


Рис. 1. Схема навантаження зразка зі сіткою тріщин термічної втоми. A – зварні шви.

Fig. 1. Loading scheme of a specimen with a mesh of thermal fatigue cracks. A – welding-joints.

Аналізована поверхня зразка вкрита сіткою тріщин термомеханічної втоми, сформованих за експлуатаційних умов під час виливання слябових заготовок на Маріупольському металургійному комбінаті ім. Ілліча. Зі зворотного боку зразка нанесені два зварні шви, що забезпечило додатковий градієнт структури та механічних характеристик на ділянках “основний метал–зона термічного впливу–метал шва” (рис. 1). Так

вдалося змоделювати взаємовплив зварних швів та тріщин термічної втоми, що типово для роликів машин безперервного виливання заготовок та валків прокатних станів.

В умовах механічного впливу це спричинило неоднорідний розподіл напружень та пластичних деформацій. Для опису механізмів деформування та руйнування матеріалу із множинними дефектами використали оптично-цифровий аналіз поверхні, метод тензометрії та алгоритм оцінювання їх просторового розташування. Осьову деформацію зразків заміряли тензометричним методом з точністю до 10^{-3} mm . Поверхню навантаженого зразка фіксували у цифровому форматі. Для кількісного аналізу виявлених дефектів використали програмний комплекс “Crack analyzer” [12]. Розвиток розтріскування під час деформування оцінювали за зміною площі v між берегами всіх тріщин у полі зору аналізованої ділянки

ки $\sum_{i=0}^n f_i$ до її площі S_{surf} [12]:

$$v = \frac{\sum_{i=0}^n f_i}{S_{\text{surf}}}, \text{ mm}^2. \quad (1)$$

Локалізацію деформацій аналізували програмним комплексом TOMSC, використовуючи оптично-цифровий метод. За характеристики структурної перебудови дефектів на поверхні матеріалу застосовували поздовжню ε_{xx} , поперечну

ε_{yy} , зсувну ε_{xy} і обертову компоненти тензора дисторсії $\beta_{ij} = \nabla \mathbf{r}(x, y)$ та інтенсивність деформації зсуву SSI (Shear Strain Intensity). Їх визначали методом числового диференціювання векторів переміщень $\mathbf{r}(x, y)$ за координатами x та y в межах аналізованої ділянки поверхні. Фрактографічні особливості руйнування зразків оцінювали на сканівному мікроскопі РЕМ 106И.

Деформування матеріалу з множинними тріщинами термічної втоми. Ураховуючи взаємодію зварних швів та множинних дефектів, змоделивали та описали деформацію і руйнування матеріалу, що забезпечило коректний аналіз їх закономірностей [17]. Для поглибленого розуміння причин активації кінетики розтріскування матеріалу шляхом формування множинних дефектів розглянули три основні чинники впливу: геометрію і просторове розташування зварних швів; розкриття-закриття множинних дефектів; обертання фрагментів неушкодженого матеріалу в блочній структурі, сформованій тріщинами термічної втоми, навколо своєї осі.

Система тріщиноподібних дефектів впливає на здатність матеріалу деформуватися, а зварні шви – на перерозподіл деформацій на поверхні зразка, що знижує інтенсивність деформування в околі прилеглих тріщин [11]. Характерним тут є виникнення в локальних ділянках навантажень стиску, або стиску і зсуву [19]. Це спричинено геометричними особливостями блочної структури розтріснутого матеріалу і її орієнтацією відносно осі навантажування. За результатами аналізу взаємодій у системі “матеріал–множинні дефекти” виявили основні закономірності деформаційної перебудови механічної дисипативної структури тріщин, а також описали еволюцію структури множини тріщин, їх розкриття та морфологічні переходи (точки біфуркації) між ними [20]. Всі ці процеси відтворює оптично-цифрове зображення і їх можна числово оцінити за відповідними параметрами.

Виявлення особливостей пошкодження з аналізу цифрового зображення. Для оцінювання міри пошкодження цифрові зображення поверхні за різних рівнів навантаження зразка розтягом (рис. 2а–с) сегментували, використовуючи бінарне перетворення. Залежно від глибини тріщин, розкриття їх берегів і тривалості впливу окиснювального середовища межі сегментів можуть бути темнішими або світлішими від фону на зображенні розтріснутої поверхні. Для їх локалізації використали дворівневе бінарне перетворення [12]. При цьому на гістограмі розрізняли два рівні яскравості зображення: B_{\min} та B_{\max} ($B_{\min} \in [0; 255]$, $B_{\max} \in [0; 255]$, де 0 і 255 – відповідно найменша та найбільша з можливих яскравостей пікселів), які розмежовують ділянки, що відповідають фону і тріщинам. Кожну точку зображення I визначали з умови

$$I(j, i) = \begin{cases} 1, & \text{при } I_0(j, i) > B_{\max} \text{ або } I_0(j, i) < B_{\min} , \\ 0, & \text{при } B_{\min} \leq I_0 \leq B_{\max} , \end{cases} \quad (2)$$

де I_0 – зображення у градаціях сірого кольору, отримане за допомогою цифрової камери.

На аналізованому зображенні фону відповідали білі пікселі, а пошкодженим ділянкам (площа між берегами тріщин термічної втоми, які проросли вглиб металу) – чорні (рис. 2d–f). Для автоматизованого оцінювання загального стану пошкодження на поверхні для кожного обробленого зображення розраховували вертикальну H_v і горизонтальну H_h гістограми яскравостей пікселів I [7]:

$$H_v(j) = \sum_{i=1}^n I(i, j) , \quad (3)$$

$$H_h(i) = \sum_{j=1}^m I(i, j) . \quad (4)$$

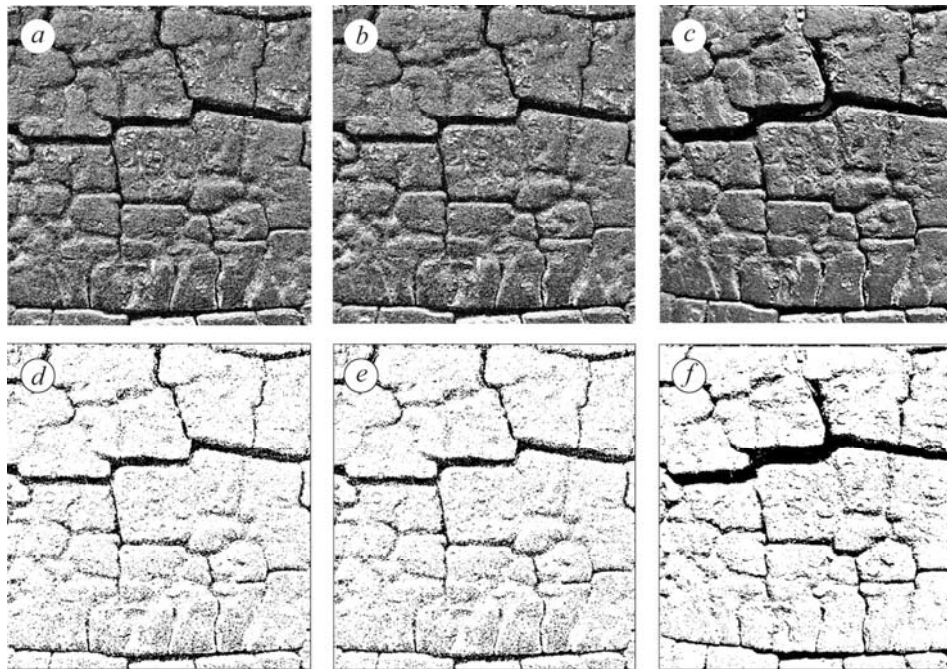


Рис. 2. Початкові (а–с) та сегментовані шляхом бінарного перетворення (d–f) зображення тріщин термічної втоми на поверхні зразка на різних стадіях його деформування.

Fig. 2. Digital images (a–c) and images segmented by binary conversion (d–f) of thermal-fatigue cracks on the specimen surface at different stages of its deformation.

Кожен елемент цих гістограм у стовпцях і рядках містить певну кількість пікселів зображення, що не дорівнює нулю. Гістограми (3), (4) служили вихідними масивами даних для оцінювання міри пошкодження аналізованої поверхні з тріщинами вздовж і впоперек напрямку прикладання до зразка навантаження (в полі двох координатних осей).

Розвиток пошкоджень на поверхні досліджуваного зразка в часі t оцінювали, використовуючи функції D_h , D_v зміни горизонтальної та вертикальної гістограм [7]:

$$D_h(t) = \frac{\Delta H_h}{\Delta t}, \quad (5)$$

$$D_v(t) = \frac{\Delta H_v}{\Delta t}. \quad (6)$$

Ці показники інтегрально характеризують зміну стану поверхні з тріщинами під час деформування, а отже, віддзеркалюють перебіг деформаційного процесу. Зокрема, за навантаження зразка в пружній області відносна площа v змінювалась на 25%, за максимального навантаження – на 31%, а в момент руйнування – на 29%. Зменшення загальної площі між берегами тріщин перед руйнуванням зразка зумовлене релаксацією напружень в околі вершин більшості тріщин термічної втоми внаслідок активного росту магістральної тріщини.

Визначення орієнтації тріщин відносно прикладеного навантаження. З аналізу деформації зразків з множинними тріщинами на поверхні у вигляді блокової мозаїки та з урахуванням результатів попередніх досліджень зробили низку висновків:

– об'єкт з такими тріщинами деформується неоднорідно, тому цей процес можна розглядати на основі підходів фізичної мезомеханіки;

– продемонстровано можливість використання оптично-цифрових методів та запропоновано характеристики, що описують активацію розтріскування, спричинену кінетичними особливостями деформування і локалізацією у такому тілі деформацій;

– активація розтріскування, або об'єднання тріщин термічної втоми призводить до переходу на вищий структурний рівень деформування;

– зразок руйнується через втрату зсувної макротривкусті і деформується на макрорівні, причому сам перехід стає точкою біфуркації.

За орієнтацією тріщин у точках біфуркації (рис. 3) ідентифікували окремі тріщини та вичленили взаємозв'язок між ними в межах аналізованої ділянки поверхні матеріалу. При цьому зміщення його фрагментів залишається одним з проявів мезорівня деформування [21]. З діаграм зміни орієнтацій тріщин очевидна структурна перебудова металу, що проявляється ротаційно-зсувними процесами поблизу берегів тріщин.

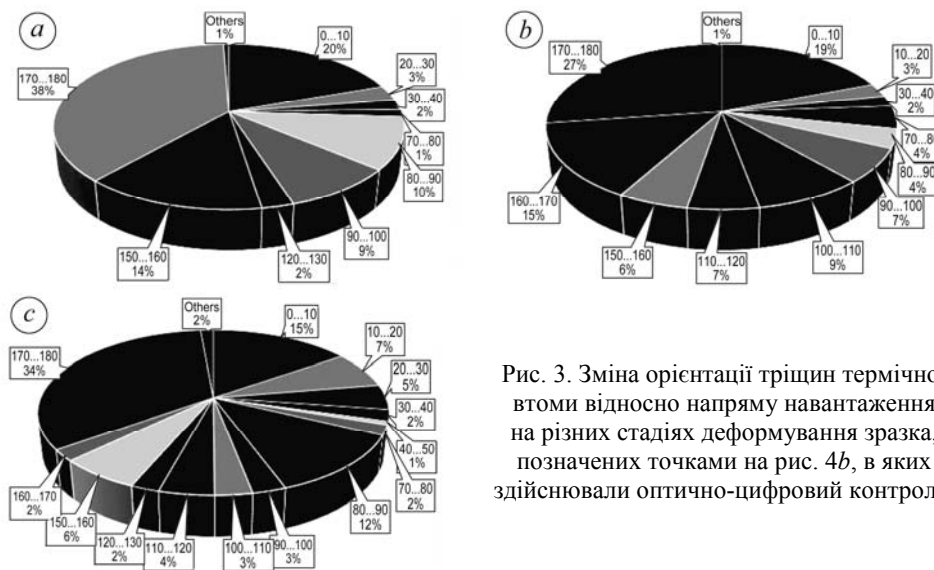


Рис. 3. Зміна орієнтації тріщин термічної втоми відносно напрямку навантаження на різних стадіях деформування зразка, позначених точками на рис. 4b, в яких здійснювали оптично-цифровий контроль.

Fig. 3. The change of the thermal fatigue cracks orientation relative to the direction of loading at various stages of specimen deformation marked by the points in Fig. 4b at which the optical-digital control was carried out.

На діаграмах деформування матеріалу з тріщинами термічної втоми зафіксували (рис. 4) значну протяжність лінійної ділянки $P-\Delta l$ (рис. 4b). Отже, зразок з множинними тріщинами деформувався так, якби у ньому не було дефектів, а вплив розпоросених пошкод проявився лише збільшенням піддатливості зразка. З переходом до деформування на вищому структурно-ієрархічному рівні активувалися і одночасно розкривалися вже декілька тріщин, а за подальшого поширення деформації – розкривалися групи тріщин, що порушило суцільність матеріалу [22].

За результатами аналізу цифрових зображень поверхні зразка на різних етапах навантажування узагальнили особливості його деформування. Зауважили, що за наявності мережі різних за розмірами тріщиноподібних дефектів процес не відрізняється від властивого квазісуцільному середовищу. Це могли спричинити два зварні шви, які були макроконцентраторами і тому обмежили здатність матеріалу деформуватися. Отже, через обмеження ділянки матеріалу із тріщиноподібними дефектами по обидва боки зварними швами рівномірніше розподіляється його деформація [6]. Особливо цікавою є одночасна активація розкриття берегів

декількох тріщин, пов'язана переважно з релаксацією внаслідок ротаційних зсувів прилеглих до них ділянок неушкодженого матеріалу. Зсувні деформації зумовлені неоднорідністю матеріалу, що ще раз підтверджує правомірність аналізу матеріалу з такими дефектами як розламно-блокового середовища [3].

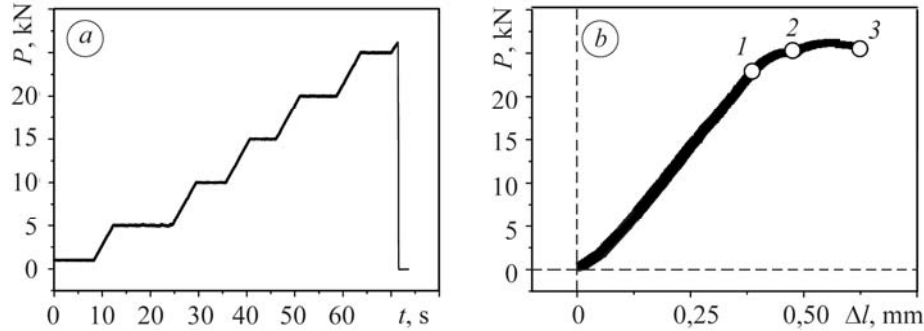


Рис. 4. Криві навантаження $P-t$ (a) та деформування $P-\Delta l$ (b) зразка зі сіткою тріщин термічної втоми: 1–3 – точки оптично-цифрового контролю.

Fig. 4. Loading curves $P-t$ (a) and a deformation curve $P-\Delta l$ (b) of the specimen with a mesh of thermal fatigue cracks: 1–3 – points of optical-digital control.

Вплив дефектності на деформування матеріалу. Обчислили поля переміщень і деформацій аналізованого зразка (рис. 5). На зображенні, що відповідає точці 1 діаграми навантаження $P-\Delta l$ (рис. 4b), з'явилися перші мезоконцентрації напружень через створення в них передумов для колективного зміщення фрагментів аналізованої поверхні (рис. 5a).

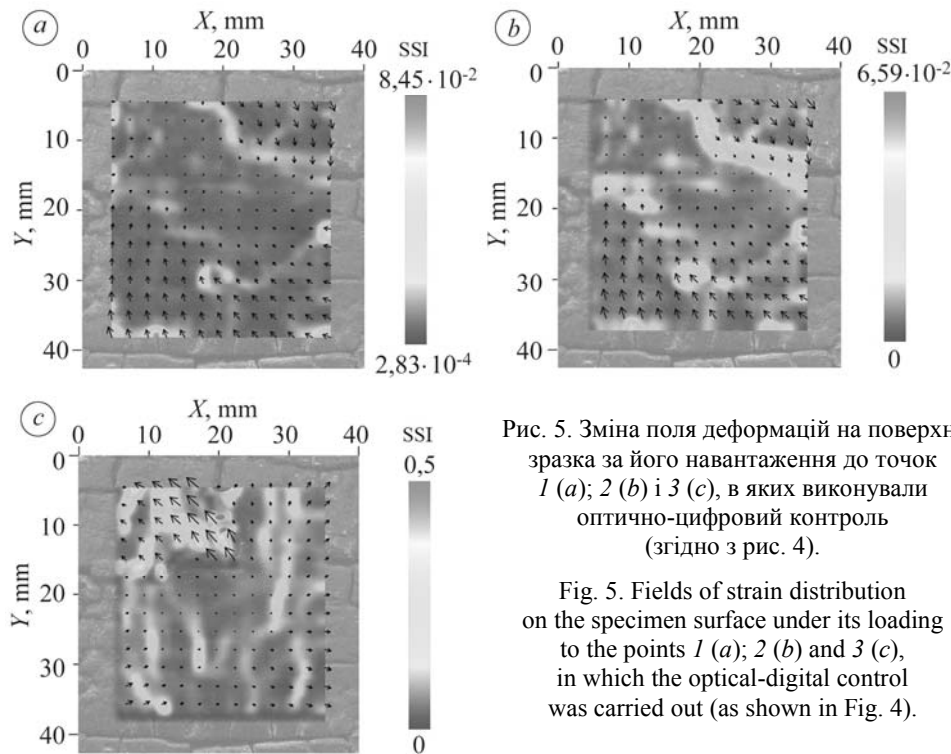


Рис. 5. Зміна поля деформацій на поверхні зразка за його навантаження до точок 1 (a); 2 (b) і 3 (c), в яких виконували оптично-цифровий контроль (згідно з рис. 4).

Fig. 5. Fields of strain distribution on the specimen surface under its loading to the points 1 (a); 2 (b) and 3 (c), in which the optical-digital control was carried out (as shown in Fig. 4).

Деформація матеріалу з множинними тріщинами залежить від геометрично-го та структурно-ієрархічного чинників. Тому навіть за навантаження в межах

пружної ділянки діаграми $P-\Delta l$ (точка 1 на рис. 4b) на поверхні зразка виявили зони пружного деформування і мікропластичного течіння (рис. 5a). Це зумовлено локалізацією деформації в елементах розламно-блокової структури на поверхні зразка з тріщинами термічної втоми [23]. Структура тріщиноподібних дефектів спричиняє нерівномірну деформацію і перебудову матеріалу (рис. 5b). Активація однієї з тріщин викликає релаксацію напружень у прилеглих ділянках [8]. Зростання інтенсивності зсуву (рис. 5b) внаслідок зміщення окремих блоків нерозтріснутого матеріалу, оточеного тріщинами, відповідає точці 2 на діаграмі $P-\Delta l$ (рис. 4b). Це дає змогу реалізувати запропонований алгоритм для виявлення деформаційних сингулярностей на поверхні. Втрата зсувної тривкості матеріалу в околі перетину кількох концентраторів напружень супроводжується локалізацією деформації [24–26] (рис. 5c). Зсувні процеси поблизу таких концентраторів поширюються на прилеглі ділянки. Деформаційні поля у матеріалі при цьому перерозподіляються. Завершальним етапом стає деформування на макрорівні [27, 28], коли матеріал досягає граничного стану (рис. 5c).

Інтерпретація результатів оцінки гістограм. Аналізуючи горизонтальну та вертикальну гістограми яскравостей пікселів зображень, ідентифікували зони активного руйнування та оцінили кінетику активації множинних тріщиноподібних дефектів. Для зображень, отриманих у точках оптично-цифрової контролю на рис. 4b, отримали функції горизонтальних H_h (3) і H_v (4) гістограм (рис. 6a, b). Піки на них вказують на місця локалізації деформації в околі виявлених пошкоджень уздовж відповідної координатної осі. Функції H_h і H_v описують статичний стан поверхні зразка з тріщинами в певний момент часу.

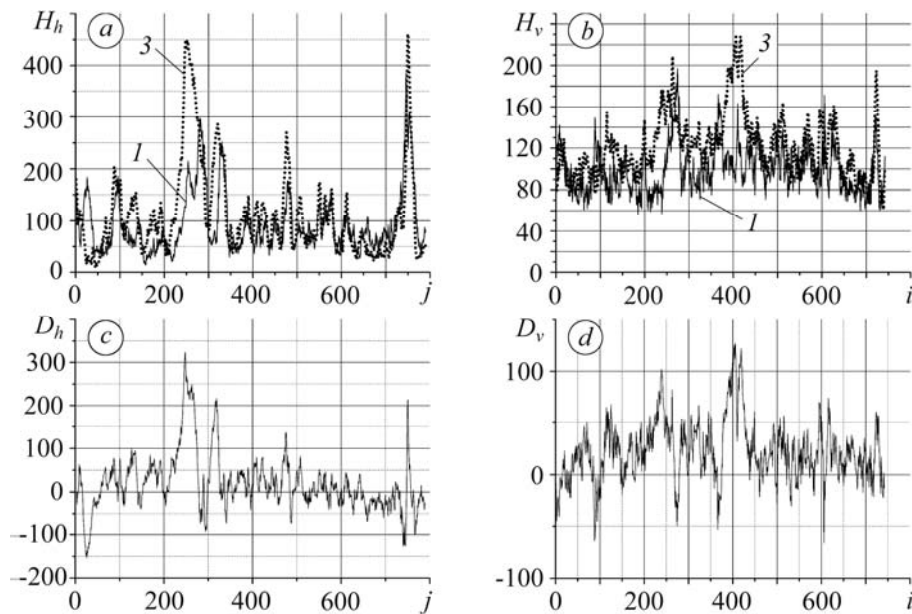


Рис. 6. Горизонтальна (a) та вертикальна (b) гістограми яскравості пікселів зображення поверхні зразка в точці 1 (суцільна лінія) та 3 (штрихова) діаграми руйнування на рис. 4b та функції їх зміни (c, d).

Fig. 6. Horizontal (a) and vertical (b) histograms of the pixel brightness of specimen surface of the image at point 1 (solid line) and 3 (dashed) of the fracture curve in Fig. 4b and the functions of their variation (c, d).

Для опису динаміки руйнування використали функції зміни гістограм D_h (5) і D_v (6) (рис. 6c, d). На графіку функції D_h виявили низку чітких піків порівняно

високої амплітуди (рис. 6с), які вказують на місця найбільшої локалізації деформації в околі пошкоджень у горизонтальній площині. Головна причина їх появи – зміщення фрагментів матеріалу внаслідок розкриття тріщин. На графіку функції зміни гістограми D , не видно яскравих пікових зон (рис. 6d), що вказує на деформування матеріалу з пошкодженнями на поверхні переважно в горизонтальному напрямі. Лінійне і кутове зміщення блокових фрагментів під час деформування зразка з тріщинами та зміна параметрів алгоритму розпізнавання тріщин спричиняють завади на графіках функцій зміни гістограм [7]. Це дещо ускладнює аналіз гістограм та визначення ділянок локалізації руйнування. На нашу думку, пропонувані підходи розвивають та доповнюють відомий [29] для аналізу тріщин термічної втоми в околі колових концентраторів.

Фрактографічний аналіз. Розглянемо закономірності руйнування на ділянці основного металу і зварного шва (рис. 7). Перший руйнувався за в'язким механізмом. На поверхні зламу зразків фіксували ділянки в'язкого відриву (нормально орієнтовані до напрямку навантаження зразка) та відносно невеликі ділянки зсуву. Метал зварного шва руйнувався за відносно крихким механізмом внаслідок значного градієнта пластичної деформації у перерізі зразка. Гладкий рельєф поверхні руйнування спричинений зсувом та обертанням.

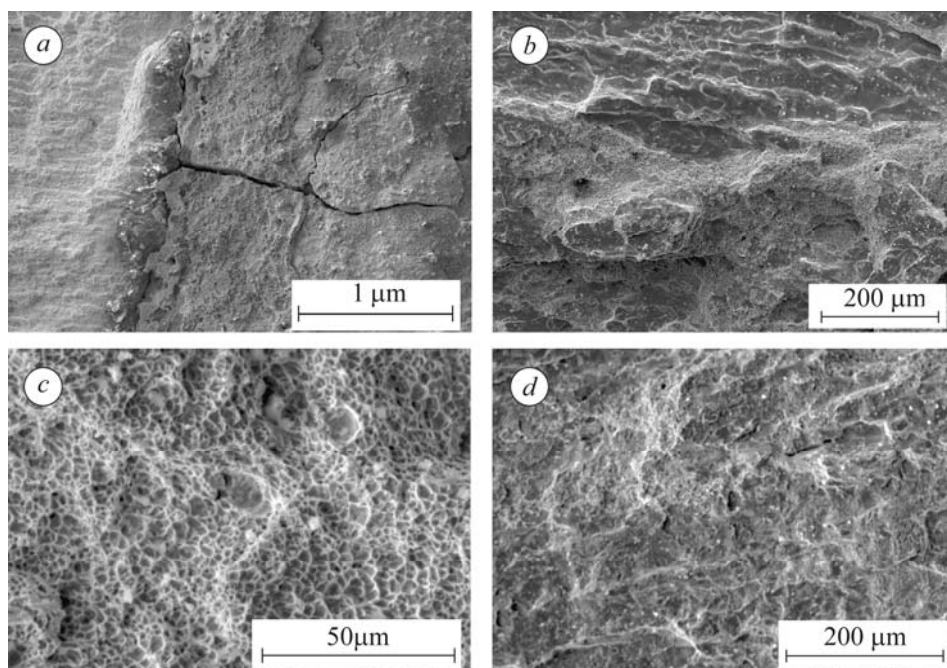


Рис. 7. Мікромеханізми руйнування в зоні “зварний шов–основний метал” (a, b) та основного металу (c) і зварного шва (d).

Fig. 7. Micromechanism of fracture in the zone “weld–base metal” (a, b) and of the base metal (c) and weld (d).

Результати, отримані з використанням тензометрії, обчислення орієнтації дефектів і розрахунку полів деформацій, дають змогу одночасно реєструвати активацію деформацій у матеріалі на різних структурних рівнях. Тензометрія реєструє її на макрорівні, або відгук зразка на силове навантаження. За зміною орієнтації окремих тріщиноподібних елементів можна описати деформаційні процеси на мезорівні. Фізико-механічні закономірності деформування матеріалу з множинними тріщиноподібними дефектами термічної втоми узагальнено у таблиці.

**Структурно-ієрархічні рівні деформування
та руйнування зразка з множинними дефектами**

Ділянки діаграми дефор- мування (див. рис. 4b)	Фактори впливу на статичну міцність	
	накопичення пошкоджень	сітка тріщин
0–1	Переважно локальне пластичне деформування на мікрорівні з окремими ознаками пластичного на фоні пружного.	У складній блоковій структурі тріщин термічної втоми на поверхні зразка є дефектні ділянки – локальні концентратори напружень, які під час деформування стають зонами локальної сингулярності деформацій.
1–2	Зниження зсувної тривкості матеріалу через вичерпування пластичності з переходом до нелінійної частини діаграми деформування за активного розтягу.	Розкриття та підростання тріщиноподібних дефектів термічної втоми з порушенням пропорційності напружень і деформацій внаслідок реалізації схеми одночасного зсуву та відриву.
2–3	Деформування внаслідок пластичної деформації. Критична деформація та втрата тривкості зразка досягаються, коли критична деформація локальних об'ємів матеріалу поширюється на його макрооб'єми.	Формування макротріщин, їх старт та підростання.

ВИСНОВКИ

Розвинуто автоматизований метод кількісного аналізу тріщин термічної втоми шляхом оброблення цифрового зображення поверхні зразка. Запропоновано алгоритм розрахунку структурно-деформаційних характеристик таких тріщин. Під час статичного деформування теплотривкої сталі 25X1M1Ф за сумісного використання тензометричного та оптично-цифрового аналізів виявлено основні стадії зміни такої інформативної характеристики, як зміщення фрагментів блоків поверхневої структури розтріскування матеріалу, спричинене термічною втомою. Під час активного навантажування зразків з розламно-блоковою структурою тріщин термічної втоми на поверхні окремі дефекти зливаються. Напряма та інтенсивність цього процесу визначаються попередньою коалесценцією тріщин, а зміщення фрагментів зразків – інтенсивністю зсувів матеріалу в межах нерозтріснутих ділянок, оточених тріщинами. Результати тензометрії доповнюють дані оптично-цифрового аналізу. Під час деформування зразка з розламно-блоковою структурою тріщин на поверхні виявили особливості релаксійних процесів на мезоструктурному рівні та закономірності самоорганізації такої структури, що є основою прогнозування місця локалізації деформацій, від яких починається макроруйнування.

РЕЗЮМЕ. По результатам автоматизированного анализа изображений поверхностей с трещинами установлены особенности деформирования и разрушения теплостойкой стали 25X1M1Ф. Выявлены и количественно описаны закономерности и характерные этапы ее деформирования с трансформацией на поверхности блоковой структуры растрескивания вследствие объединения отдельных трещин термической усталости в сетку, которая

определяется способностью металла деформироваться в пределах островков нестресснутого материала, окруженных трещинами. Мера взаимодействия каждой из трещин с их множеством оценено по интенсивности сдвиговых и ротационных процессов в середине блоков материала, неповрежденных трещинами термической усталости, и изменению их ориентации относительно направления прикладываемого нагружения.

SUMMARY. According to the results of the automated analysis the basic regularities of deformation and fracture of heat-resistant 25X1M1Φ steel with a formed grid of thermal fatigue cracks was established. The basic patterns and characteristic stages of the process of deformation were identified and quantitatively described. Behaviour of the block structure failure of the material was determined by combining individual defects and deformation properties of the “islands” surrounded by the material cracks. The level of interaction of each of the crack with their multiplicity was evaluated by the intensity of the shear and rotation processes inside the material blocks, not damaged by thermal fatigue cracks, and by the orientation change with respect to the applied loading direction.

1. Скальський В. Р., Андрейків О. Є. Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії. – Львів: Вид. центр ЛНУ ім. І. Франка, 2006. – 330 с.
2. Особливості програмного забезпечення акустико-емісійних засобів неруйнівного контролю / В. Р. Скальський, О. М. Станкевич, Б. П. Клим та ін. // Техн. діагностика и неразр. контроль. – 2010. – № 3. – С. 5–13.
3. Сызранцев В. Н., Голофаст С. Л. Измерение циклических деформаций и прогнозирование долговечности деталей по показаниям датчиков деформаций интегрального типа. – Новосибирск: Наука, 2004. – 206 с.
4. Любутин П. С. Алгоритмы и программные средства анализа оптических изображений поверхности материалов для оценки их деформации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2009. – 20 с.
5. Application of an optimized digital image correlation method to planar deformation analysis / M. A. Sutton, M. Cheng, W. H. Peters et al. // Image Vision Computing. – 1986. – 4. – P. 143–150.
6. Yasniy P., Maruschak P., and Konovalenko I. Measurement of surface mesostrain of plastically deformed steel // Strain. – 2011. – 47. – P. 238–241.
7. Konovalenko I. B. and Maruschak P. O. Automated method for studying the deformation behavior of a material damaged by a thermal fatigue crack network // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2013. – 49, № 3. – P. 243–249.
8. On thermally induced multiple cracking of a surface: an experimental study / V. Yasniy, P. Maruschak, O. Yasniy, Y. Lapusta // Int. J. Fract. – 2013. – 181. – P. 293–300.
9. Maruschak P. O., Konovalenko I. V., and Bishchak R. T. Effect of thermal fatigue cracks on brittle-ductile deformation and failure of CBCM roller surface layers // Metallurgist. – 2012. – 56, № 1–2. – P. 30–36.
10. Influence of deformation process in material at multiple cracking and fragmentation of nanocoating / P. O. Maruschak, S. V. Panin, S. R. Ignatovich et al. // Theor. and Appl. Fract. Mech. – 2012. – 57. – P. 43–48.
11. 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.
12. Ясній П. В., Марущак П. О. Ролики МБЛЗ: Деградація і тріщиностійкість матеріалів. – Тернопіль: Джура, 2009. – 232 с.
13. Physical regularities in the cracking of nanocoatings and a method for an automated determination of the crack-network parameters / P. Maruschak, V. Glina, I. Konovalenko et al. // Mat. in Technol. – 2012. – 46, № 5. – P. 525–529.
14. Automated diagnostics of damage to an aluminum alloy under the conditions of high-cycle fatigue / P. Maruschak, I. Konovalenko, M. Karuskevich et al. // Ibid. – 2013. – 47, № 3. – P. 357–361.
15. Marushchak P. O. and Konovalenko I. V. Computer evaluation of the depth of thermomechanical fatigue cracks according to their length // Mat. Scie. – 2012. – 48. – P. 54–64.
16. Многомасштабный метод изучения деформации и разрушения нагруженных твердых тел по данным акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и тензо-

- метрии / С. В. Панин, А. В. Бяков, П. С. Любутин и др. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2011. – 77, № 9. – С. 50–59.
17. *Panin V. E., Grinyaev Yu. V., and Egorushkin V. E.* Foundations of physical mesomechanics of structurally inhomogeneous media // *Mech. Solids*. – 2010. – 45. – P. 501–518.
 18. *Relaxation* mechanism of rotational type in fracture of weld joints for austenic steels / V. E. Panin, V. S. Pleshanov, S. A. Kobzeva, and S. P. Burkova // *Theoretical and Appl. Fract. Mech.* – 1998. – 29. – P. 99–102.
 19. *Kushch V. I., Shmegeera S. V., and Sevostianov I.* SIF statistics in micro cracked solid: Effect of crack density, orientation and clustering // *Int. J. Engng. Scie.* – 2009. – 47. – P. 192–208.
 20. *Caiulo A. and Kachanov M.* On absence of quantitative correlations between strength and stiffness in microcracking materials // *Int. J. Fract.* – 2010. – 164. – P. 155–158.
 21. *Panin V. E., Goldstein R. V., and Panin S. V.* Mesomechanics of multiple cracking of brittle coatings in a loaded solid // *Ibid.* – 2008. – 150. – P. 37–53.
 22. *Стадийность* локализованной пластической деформации при растяжении образцов сплава Д16АТ по данным акусто-эмиссии, картирования деформации на поверхности и тензометрии. I. Образцы с отверстиями различного диаметра / С. В. Панин, А. В. Бяков, П. С. Любутин, О. В. Башков // *Дефектоскопия*. – 2011. – № 9. – С. 49–61.
 23. *Panin V. E.* Overview on mesomechanics of plastic deformation and fracture of solids // *Theoretical and Appl. Fract. Mech.* – 1998. – 30. – P. 1–11.
 24. *Панин С. В., Стефанов Ю. П., Любутин П. С.* Оценка деформаций на мезоуровне, вызванных распространением трещины, путем количественной обработки полей векторов перемещений в оптико-телевизионной системе // *Физ. мезомеханика*. – 2009. – 12, № 3. – С. 45–53.
 25. *Многомасштабное* исследование стадийности локализованной пластической деформации при растяжении образцов сплава Д16АТ с надрезами акусто-эмиссионным и оптико-телевизионным методами / С. В. Панин, А. В. Бяков, В. В. Гренке и др. // *Там же*. – 2009. – 12. – № 6. – С. 63–72.
 26. *Study* of localized strain at micro-, meso- and macrolevels in AA2024 alloy by data of acoustic emission, surface strain mapping and strain gauging / A. V. Byakov, S. V. Panin, V. V. Grenke et al. // *Proc. Engng.* – 2009. – 1. – P. 71–74.
 27. *Исследование* локализованной деформации при нагружении образцов из углерод-углеродного композиционного материала с различными концентраторами напряжений по данным акусто-эмиссии, метода корреляции цифровых изображений и тензометрии / С. В. Панин, М. В. Бурков, А. В. Бяков и др. // *Перспективные материалы*. – 2011. – 1, Спец. вып. № 13. – С. 129–138.
 28. *Стадийность* локализованной деформации при растяжении образцов из углерод-углеродного композиционного материала с отверстиями различного диаметра по данным акустоэмиссии, картирования деформации на поверхности и тензометрии / С. В. Панин, М. В. Бурков, А. В. Бяков и др. // *Дефектоскопия*. – 2012. – № 10. – С. 57–70.
 29. *Оцінка* пошкоджень колектора водяного економайзера тріщинами термічної втоми / Р. Я. Косаревич, О. З. Студент, Я. Д. Онишак та ін. // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2004. – 40, № 1. – С. 109–114.
- (*Astimation* of damage to the collector of a water economizer by thermal fatigue cracks / R. Ya. Kosarevych, O. Z. Student, Ya. D. Onyshchak, A. D. Markov, I. V. Ripei, B. P. Rusyn, and H. M. Nykyforchyn // *Materials Science*. – 2004. – 40, № 1. – P. 132–138.)

Одержано 26.11.2013