

## ВИКОРИСТАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ НЕЧІТКИХ МНОЖИН ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНОГО АНАЛІЗУ ФОРМИ ТА РОЗМІРІВ ЯМОК ВІДРИВУ

*І. В. КОНОВАЛЕНКО, П. О. МАРУЩАК*

*Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя*

Запропоновано автоматизований метод аналізу форми та розмірів ямок в'язкого відриву, утворених під час руйнування титанового сплаву ВТ23. Метод можна використовувати у системах технічної діагностики. Розроблено підходи до аналізу зображень поверхонь руйнування, одержаних на сканівному мікроскопі. Запропонований метод дає змогу виділяти складові частини досліджуваних об'єктів, здійснювати їх морфологічний аналіз, а також оцінювати їхній взаємозв'язок.

**Ключові слова:** *ямки відриву, механізми руйнування, обробка зображень, розпізнавання, нечіткі множини.*

Фрактографічне дослідження є одним з найінформативніших для оцінювання причин та механізмів руйнування матеріалів і конструкцій [1, 2]. Разом з тим цей метод є трудомістким та вимагає значної кількості вимірювань об'єктів на зображеннях поверхонь руйнування. Інтерпретація виявлених результатів та оцінювання впливу структурних і металургійних чинників на руйнування матеріалів також потребує накопичення та аналізу значних масивів даних [3, 4].

Дослідження фізико-механічних закономірностей руйнування матеріалів і конструкцій неможливе без кількісного опису морфології їх зламів, форми та розмірів елементів мікрорельєфу. Використання таких підходів дає змогу автоматизувати сегментацію та тривимірну реконструкцію ямок в'язкого відриву, що підвищує точність та достовірність одержаних результатів [5–8].

Для виявлення та аналізу ямок відриву на поверхні руйнування матеріалу розроблено низку методик, основаних на аналізі зображення поверхні [4–9]. При цьому використовують поєднання різних відомих алгоритмів для аналізу зображення (зокрема, аналіз гістограми зображення та текстур, граничне перетворення, фільтрування, вейвлети). Незважаючи на ефективність, описані алгоритми мають недоліки. Здебільшого їх використання вимагає емпіричного підбору параметрів для зображень певного типу. Це вносить в алгоритм суб'єктивний фактор та не дає змоги оцінити ступінь можливих змін у результаті його роботи.

Як показано раніше [3, 9], кількісне оцінювання інформативних фрактографічних ознак зламів та структурних складників металу відкриває перспективу виявлення кореляційних зв'язків між ними та механічними характеристиками конструкційних матеріалів, що особливо важливо для аналізу пошкоджень.

Актуальність цієї роботи також у тому, що запропоновані підходи дають змогу встановити низку закономірностей механічної поведінки пор, утворених під час статичного деформування, які практично неможливо виявити іншими методами. Це дозволить у межах єдиного підходу систематизувати та числово охарактеризувати виявлені фрактодіагностичні закономірності.

Мета роботи – створити і апробувати метод для кількісного аналізу форми та розмірів ямок відриву на поверхні руйнування титанового сплаву шляхом аналізу цифрового зображення поверхні.

**Дослідження статичного розтягу (СР) та динамічного нерівноважного процесу (ДНП) сплаву ВТ23.** Випробовували з використанням розробленої і неодноразово апробованої методики реалізації ДНП на зразках із листового двофазного високоміцного сплаву ВТ23 товщиною 3 mm, застосовуючи ударно-коливальне навантаження [10, 11]. На партії зразків із титанового сплаву ВТ23 (48 штук) послідовно відпрацьовано низку режимів навантажування. Зразки досліджували за таких схем деформування:

1. Статичний розтяг до руйнування (СР).

2. Статичний розтяг зразка до напружень  $0,03\sigma_Y$  – імпульсне силове додаткове навантаження до сумарних напружень на зразку  $\sim \sigma_Y$  ( $\sigma_{\Sigma} = \sigma_{\text{stat}} + \sigma_{\text{imp}} = \sigma_Y$ ) – подальший статичний розтяг до руйнування зразка (ДНП1).

3. Статичний розтяг зразка до напружень  $0,03\sigma_Y$  – імпульсне силове додаткове навантаження до сумарної пластичної деформації на зразку 0,5...10% – подальший статичний розтяг до руйнування зразка (ДНП2).

У дослідах для реалізації обох видів ДНП руйнівне зусилля “крихких проб” в межах 42...156 kN.

**Алгоритм для аналізу зображення.** Руйнування титанового сплаву розглядали як локалізоване деформування. При цьому на новоутворених поверхнях відображені особливості його кінетики. Отже, поверхня руйнування є повним “відбитком” граничного стану матеріалу, а особливості її морфології є проявами деформаційних процесів у матеріалі.

Вихідним для пропонованого алгоритму є зображення поверхні руйнування титанового сплаву ВТ23 у градаціях сірого кольору, отримане за допомогою електронного мікроскопа РЕМ 106-И (рис. 1). Алгоритм містить дві частини – базову та аналітичну. Метою базової частини алгоритму є сегментація зображення на два сегменти: фон та об’єкти. Аналітична частина алгоритму призначена для оцінювання неоднозначності розпізнавання ділянок знайдених об’єктів. Базовий алгоритм для обчислення параметрів об’єктів (ямок) за допомогою їх зображення містить операції фільтрування та граничного перетворення [12].

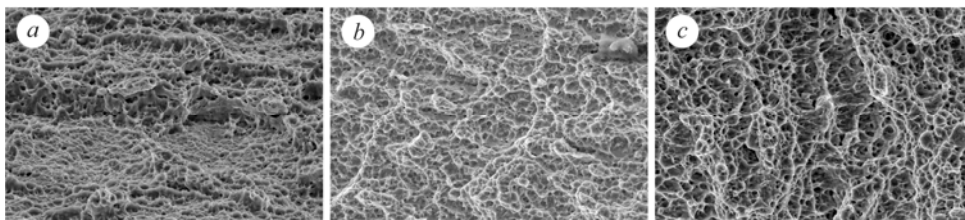


Рис. 1. Початкові зображення поверхонь зламу титанового сплаву ВТ23 при СР (а), ДНП1 (b), ДНП2 (c).

Fig. 1. Initial images of fracture surfaces of BT23 titanium alloy under static tension (ST) (a), dynamic non-equilibrium process DNP1 (b), DNP2 (c).

Візуальний аналіз зображень поверхонь руйнування дає змогу стверджувати, що вони утворені внаслідок зародження та злиття пор. При цьому форма та розміри пор є інформаційною ознакою, яку нижче буде досліджено. Такий підхід дозволить пов’язати структурну неоднорідність, сформовану у титановому сплаві за різних схем деформування, із механізмами та етапами розвитку пор [13].

**Базова частина алгоритму.** Базова частина алгоритму [14] містить операції фільтрування та сегментації. Фільтрування за допомогою Гаусівського фільтра

дозволяє згладити переходи між різними ділянками зображення і зменшити фрагментацію розпізнаних об'єктів. Під час фільтрування важливим параметром є розмір ядра фільтра, оскільки він впливає на відсіювання фонових пікселів та об'єднання відокремлених фрагментів об'єкта розпізнавання. Тому його зміна помітно впливає на кінцевий результат розпізнавання. Розмір ядра Гаусівського фільтра є першим важливим параметром алгоритму.

Після фільтрування сегментували, виділяючи на зображенні пікселі, які відповідають пошкодженим зонам. Для цього використали адаптивне граничне перетворення Бредлі на основі інтегрального зображення [15]. Кожен піксель вважається приналежним об'єкту, якщо його яскравість на заданий відсоток менша за середню яскравість оточуючих пікселів у вікні заданого розміру. Інтегральне зображення обчислюють перед граничним перетворенням, що суттєво зменшує кількість обчислень для кожного пікселя. Кожен елемент інтегрального зображення з координатами  $(x, y)$  містить суму яскравостей пікселів, розташованих лівіше і вище за точку  $(x, y)$ .

Вибір параметра розподілу пікселів на фоніві та належні об'єкту суттєво впливає на результат розпізнавання. Неправильний підбір призведе до того, що частина об'єктів розпізнавання буде прийнята за фон або будуть розпізнані об'єкти, які насправді є фоном. Зокрема, зміна межі фону граничного перетворення спричиняє зміщення краю знайдених на зображенні об'єктів. Внаслідок цього змінюватимуться геометричні характеристики розпізнаних об'єктів. Межа фону є другим важливим параметром алгоритму.

Отримане в результаті вказаних перетворень зображення  $I_b(x, y)$  з двома сегментами (білі об'єкти та чорний фон) містить інформацію про форму та площу об'єктів. З його допомогою можна обчислити кількість об'єктів, їх розміри та координати.

Результати, отримані з використанням різних наборів значень важливих параметрів алгоритму, будуть дещо відрізнятися. Відповідно ідентифіковані об'єкти матимуть трохи відмінні геометричні параметри [14].

**Аналітична частина алгоритму.** Для виявлення та врахування впливу важливих параметрів алгоритму на кінцевий результат використали підхід, який передбачає розпізнавання зображення за достатньо великої підмножини наборів значень параметрів базового алгоритму. При цьому результат розглядають як нечітку множину з функцією приналежності кожного її елемента (пікселя), яка дорівнює кількості наборів параметрів, що призвели до розпізнавання цього елемента приналежним об'єктові [9].

Позначимо множину важливих параметрів алгоритму, які суттєво впливають на його роботу, як  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_\eta\}$ , де  $\eta$  – кількість параметрів. Тут  $P_1$  відповідає розміру ядра фільтра Гауса,  $P_2$  – межі граничного перетворення Бредлі, тобто  $\eta = 2$ . Припустимо, що значення кожного з параметрів  $P_i$  може змінюватися у діапазоні  $[\pi_{i \min}, \pi_{i \max}]$  із кроком  $\delta\pi_i$ . Тоді  $P = (\pi_1, \pi_2)$  – конкретний набір значень параметрів, за яких отримано результуюче зображення.

Звідси множина всіх точок зображення, які належать об'єктам за цього набору значень параметрів алгоритму:

$$E(P) = \{(x, y) \mid \chi_F(x, y, P) = 1\}, \quad \chi_F(x, y, P) = \begin{cases} 1, & \forall i(x, y) \in E(P); \\ 0, & \forall i(x, y) \notin E(P), \end{cases} \quad (1)$$

де  $\chi_F$  – характеристична функція, яка дорівнює 1, якщо піксель  $(x, y)$  розпізнано як частину об'єкта, і 0 в протилежному випадку.

Кожному набору значень параметрів алгоритму  $P_k, k = \overline{1, K}$  (де  $K$  – кількість наборів значень) відповідає своя множина точок  $E(P_k)$ . Тоді функція, яка підраховуватиме кількість розпізнавань точки  $(x, y)$  як частини об'єкта для всіх досліджених  $K$  наборів значень, дорівнюватиме:

$$S(x, y) = \sum_{k=1}^K \chi_F(x, y, P_k). \quad (2)$$

Узагальнена блок-схема розрахунку акумуляторної функції  $S(x, y)$  показана на рис. 2. Накопичення значень функції  $S(x, y)$  відбуватиметься, доки не будуть перебрані значення всіх змінних параметрів  $\Pi_i$  в діапазоні  $[\pi_{i \min}, \pi_{i \max}]$  з кроком  $\delta \pi_i$ . На практиці це виконували за допомогою вкладених циклів, коли цикл для перебирання значень певного параметра знаходиться в межах циклу перебирання значень іншого параметра.

Далі до функції  $S(x, y)$  застосуємо операцію розкриття математичної морфології. Це дасть змогу вилучити малі несуттєві об'єкти, зберігаючи великі об'єкти незмінними. В результаті отримаємо функцію  $S_o(x, y)$ .

Функцію  $S_o(x, y)$  можна візуалізувати у вигляді зображення в градаціях сірого кольору  $I_S(x, y)$ . При цьому яскравість пікселя представлятиме значення функції у відповідній точці. Тоді світлі ділянки відповідатимуть частинам зображення, на яких край об'єкта розпізнавали частіше – за більшої кількості різних наборів значень параметрів  $P = \{\pi_1, \pi_2\}$ . Стрімкість схилів (рис. 3) на зображенні функції  $S_o(x, y)$  характеризує розкид розпізнаних країв об'єктів.

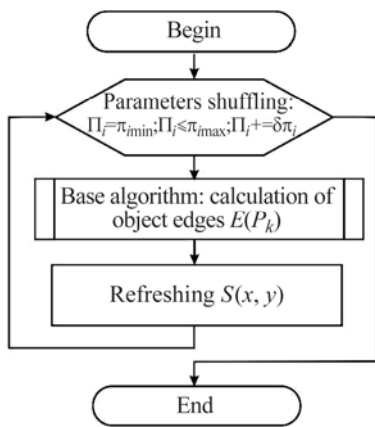


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Блок-схема аналізу зображення для різних наборів значень параметрів.

Fig. 2. Block diagram of image analysis for different sets of parameters.

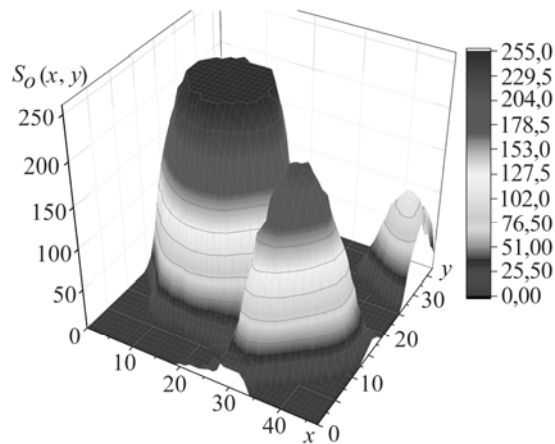


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Тривимірне подання функції  $S_o(x, y)$  для фрагмента зображення на рис. 1b.

Fig. 3. Three-dimensional representation of function  $S_o(x, y)$  for an image patch in Fig. 1b.

Після нормалізації значень функції  $S_o(x, y)$  отримаємо нечітку множину  $\tilde{C} = \{(x, y) \mid \mu_{\tilde{C}}(x, y)\}$  з функцією приналежності  $\mu_{\tilde{C}}(x, y)$ :

$$\mu_{\tilde{C}}(x, y) = \frac{S_o(x, y)}{\sup(S)}. \quad (3)$$

Нечітка множина  $\tilde{C}$  містить детальну інформацію про ступінь приналежності її точок об'єктам, які розраховані для всіх розглянутих наборів значень параметрів алгоритму, і представляє "нечіткі об'єкти". Функція приналежності  $\mu_{\tilde{C}}(x, y)$  визначає імовірність розпізнавання точки  $(x, y)$  зображення як складової об'єкта для дослідженої сукупності значень параметрів алгоритму. Тоді  $\alpha$ -зріз множини  $\tilde{C}$  містить точки, які належать об'єктам з певною імовірністю  $\alpha$ :

$$\tilde{C}(\alpha) = \{(x, y) \mid \mu_{\tilde{C}}(x, y) \geq \alpha\}, \quad \alpha \in [0, 1]. \quad (4)$$

**Результати аналізу зображень.** Графічне подання  $\alpha$ -зрізів при  $\alpha = 0,1; 0,3$  та  $0,5$  подане на рис. 4. Розпізнані об'єкти (ямки) показані на цих зображеннях окремими оточеними фоном утвореннями. Ширина схилу такого об'єкта представляє розкид лінійних розмірів розпізнаних об'єктів, який викликаний зміною параметрів алгоритму  $\Pi_i$  в діапазоні  $[\pi_{i\min}, \pi_{i\max}]$ . При  $\alpha \leq 0,05$  (для розглянутого зображення) суміжні об'єкти об'єднуються.

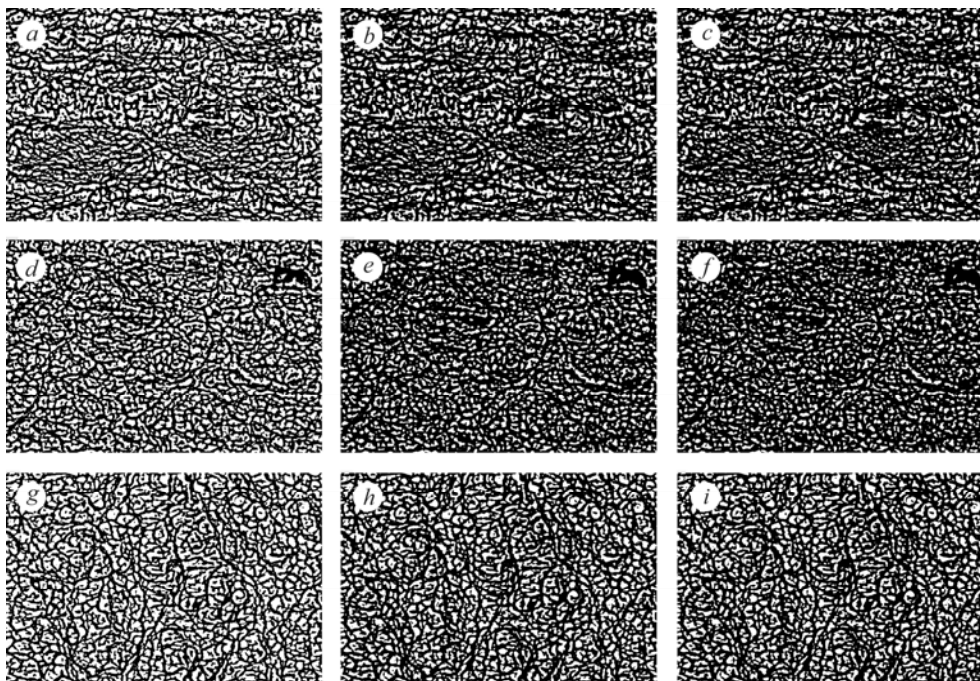


Рис. 4. Графічне подання  $\alpha$ -зрізів нечіткої множини  $\tilde{C}$  для зображень на рис. 1a (a–c), рис. 1b (d–f) та рис. 1c (g–i) при  $\alpha = 0,1$  (a, d, g);  $0,3$  (b, e, h) та  $0,5$  (c, f, i).

Fig. 4. Graphical representation of  $\alpha$ -cuts of fuzzy set  $\tilde{C}$  for images in Fig. 1a (a–c), Fig. 1b (d–f) and Fig. 1c (g–i) at  $\alpha = 0,1$  (a, d, g);  $0,3$  (b, e, h) and  $0,5$  (c, f, i).

За відносно високих значень  $\alpha$  ( $\alpha > 0,16$ ) зрізи матимуть зони, які найкраще розпізнаються алгоритмом, але частина об'єктів втрачається. Емпіричним шляхом виявлено, що для дослідженої множини зображень оптимальним для виділення об'єктів є  $0,06 \leq \alpha \leq 0,16$ .

**Еквівалентний діаметр.** Досліджена поверхня руйнування має ямкову структуру, утворену внаслідок злиття множини мікропор. Локалізація та ідентифікування ямок на зображенні свідчить, що виникнення пор супроводжувалось пластичним деформуванням перетинок між ними [16, 17]. Проте вони є достатньо товстими для того, щоб ідентифікувати кожен окрему ямку. Гребені відриву

між порами мають матову нерівну поверхню, яка відрізняється за кольором на різних ділянках зламу. Поверхня руйнування є нерівною, на бічних поверхнях великих ямок, окреслених гребенями відриву, розташовані дрібніші ямки.

Оцінювали параметри ямок, виявлених на поверхні руйнування, та обчислювали для кожної еквівалентний діаметр  $d_i$  (рис. 5). Під еквівалентним діаметром ямки мали на увазі діаметр кола з площею, яка дорівнює розпізній площі ямки. До вхідних зображень застосовували бінарне перетворення (1) і аналізували найбільший зі знайдених зв'язний елемент: обчислювали його площу (за кількістю пікселів) та координати центра мас. Це дозволило розподілити ямки за розмірами та кількісно охарактеризувати параметри перетинок між ними. Слід зазначити, що основне завдання не лише встановити розміри ямок, але й оцінити розподіл їх окремих груп в межах аналізованої площі.

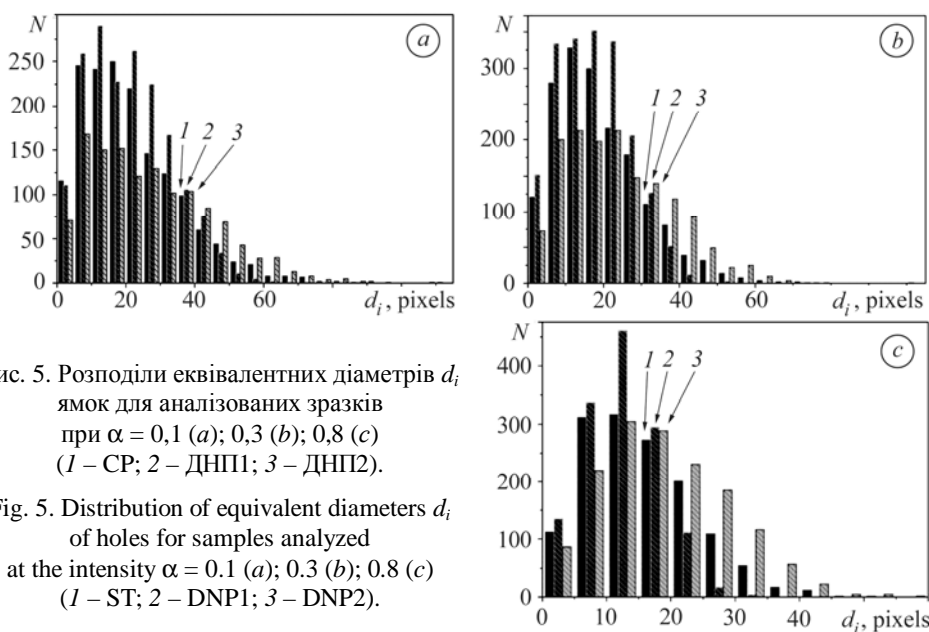


Рис. 5. Розподіли еквівалентних діаметрів  $d_i$  ямок для аналізованих зразків при  $\alpha = 0,1$  (a);  $0,3$  (b);  $0,8$  (c) (1 – SP; 2 – ДНП1; 3 – ДНП2).

Fig. 5. Distribution of equivalent diameters  $d_i$  of holes for samples analyzed at the intensity  $\alpha = 0.1$  (a);  $0.3$  (b);  $0.8$  (c) (1 – ST; 2 – DNP1; 3 – DNP2).

Для оцінювання розмірів розпізнаних об'єктів на вибраних  $\alpha$ -зрізах виділяли замкнуті, оточені фоном, об'єкти. Діаграми їх розподілу для різних  $\alpha$  показано на рис. 5. Для  $\alpha = 0,05$  зменшується кількість малих об'єктів (до 10 px) та зростає кількість великих (більше 50 px). Це пов'язано зі зрощуванням суміжних об'єктів за низьких значень  $\alpha$ . Також діаграми демонструють зміщення в сторону дрібних об'єктів при  $\alpha = 0,3$ .

**Макропараметри як інтегральний індикатор.** Ще однією характеристикою поверхні з ямками в'язкого відриву є параметр  $S_{obj}$ . Відносну частку пошкодження визначали як відношення суми площ корозійних ямок до площі дослідженої ділянки [18, 19]:

$$S_{obj} = \sum_{i=0}^r f_i / S_{surf}, \quad (5)$$

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

Цей параметр характеризує площу ямок, розпізнаних за низки граничних значень інтенсивності  $I_{lim}$  (рис. 6). Слід зазначити, що графік має вигляд ламаної, а нахил його окремих частин вказує на чутливість обчисленого параметра до  $I_{lim}$ .

Він є монотонно спадним, що узгоджується із розчиненням ямок та зростанням кількості між'яmkового простору за умов зростання  $I_{lim}$ . Верхня частина графіка вказує на те, що для  $I_{lim} = 25$  площа виявлених об'єктів є максимальною, проте як пори можуть бути розпізнані окремі ділянки міжпорових меж. На нижній частині графіка бачимо, що для  $I_{lim} = 200$  знижується кількість розпізнаних пор, алгоритм перестає розрізняти частину з них через зростання частки міжпорового простору. Найінформативнішою є горизонтальна ділянка графіка від  $I_{lim} = 78$  до  $I_{lim} = 130$ . В її межах вплив алгоритму на виявлені параметри ямок є незначним. Вважали, що саме ці умови є оптимальними для аналізу зображень поверхонь зламу.

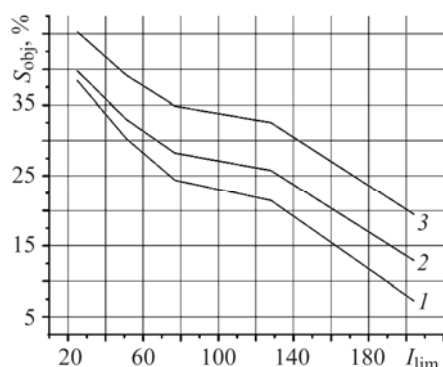


Рис. 6. Залежність площі ямок  $S_{obj}$  від граничного значення інтенсивності  $I_{lim}$ : 1 – SP; 2 – ДНП1; 3 – ДНП2.

Fig. 6. Dependence of the holes square  $S_{obj}$  on limit intensity  $I_{lim}$ : 1 – ST; 2 – DNP1; 3 – DNP2.

Таким чином, параметри виявлених пор залежать від інтенсивності  $I_{lim}$ . Проте є певні фізичні закономірності матеріалу, які нечутливі до її значення, зокрема рівновіддаленість залежності  $S_{obj}-I_{lim}$  за різних інтенсивностей. Але слід зазначити, що для ямок статично деформованого зразка їх площа завжди менша, ніж для зразків після ДНП. Значення  $S_{obj}$  та  $S_p$  в межах ділянки  $78 \leq I_{lim} \leq 130$  подані у таблиці.

### Результати аналізу зображень поверхонь руйнування титанового сплаву BT23

Тип деформування	Площа ямок $S_{obj}$ , %	Площа перетинок $S_p$ , %
SP	22,0...24,0	78,0...76,0
ДНП1	26,0...28,0	74,0...72,0
ДНП2	32,5...35,0	67,5...65,0

**Статика.** Кінетику деформування визначав напружено-деформований стан у шийці зразків. У зламі утворюються округлі пори. Деформування відбувається шляхом потоншення міжпорових ділянок, при цьому виникають локалізовані тривісні деформації [17].

**ДНП.** Активну роль відіграє зароджена тріщина, яка змінює механізм руйнування. Переважає механізм локалізації пластичної текучості [20]. Поширення тріщини сприяє релаксаційним процесам у її околі, що зумовлює формування подовгастих ямок. Тобто механізм яmkовий, проте кінцевий розрив між'яmkових меж відбувається за механізмом зсуву.

Такі особливості накопичення пор можна пояснити поточною пошкодженістю матеріалу, що притаманно окремим стадіям накопичення дефектів, утворення пор та їх злиття.

**Форма ямок в'язкого відриву.** Характер розвитку пошкоджень поверхні визначають за параметрами розташованих на ній ямок відриву [3, 21]. Емпірично встановлено, що для їх класифікації інформативним є коефіцієнт форми ямок. Щоб виявити зміни у формі ямок, використовували коефіцієнт круглості  $K_c$ , який

дорівнює відсотку попадання пікселів ямки у коло з еквівалентним діаметром  $d_i$ , центр якого суміщено з центром мас ямки  $C_i(x_{ci}, y_{ci})$  [18]:

$$K_c = \frac{\sum_{m=1}^{f_i} g(\vec{r}_m, d_i)}{f_i} \cdot 100\%, \quad (6)$$

де  $g(\vec{r}_m, d_i)$  – індикаторна функція, яка показує чи потрапляє  $m$ -ий піксель отвору в межі кола з еквівалентним діаметром  $d_i$ ;

$$g(\vec{r}_m, d_i) = \begin{cases} 1, & \text{при } |\vec{r}_m| \leq d_i / 2; \\ 0, & \text{при } |\vec{r}_m| > d_i / 2, \end{cases} \quad (7)$$

$\vec{r}_m$  – радіус-вектор, направлений від центра кола  $C_i(x_{ci}, y_{ci})$  до  $m$ -го пікселя об'єкта з координатами  $(x_m, y_m)$ .

**Коефіцієнти форми ямок.** Побудовано криві (рис. 7), які відображають залежність форми ямки  $K_c$  від її еквівалентного діаметра. Отриману множину даних для кожного зображення апроксимовано прямою за методом найменших квадратів. Визначено кут нахилу одержаної прямої до вертикалі. Слід зауважити, що цей параметр має фізичний зміст, який полягає в тому, що зростання його значення свідчить про наближення форми ямок аналізованої сукупності до округлої.

Виявлено, що криві розташовані під кутом  $59^\circ \dots 70^\circ$  до вертикалі, тобто у достатньо вузькому діапазоні. Встановлено, що малі ямки відриву мають близьку до округлої форму (рис. 7). Подальший розвиток та об'єднання ямок свідчить про певну тенденцію до набуття ними круглішої форми, згладжування крайових ефектів та орієнтацію вздовж певного напрямку.

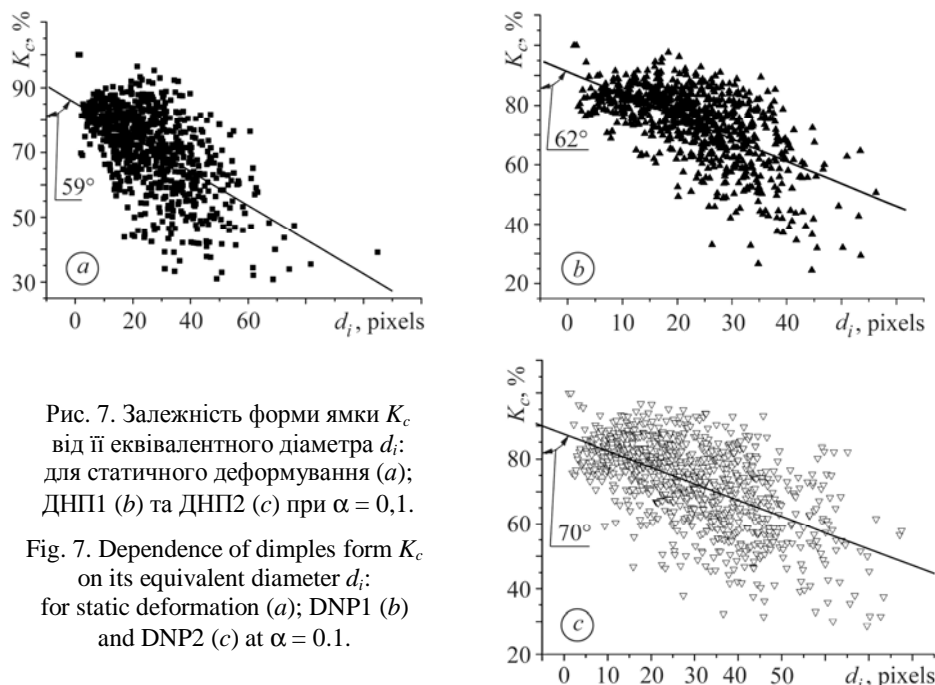


Рис. 7. Залежність форми ямки  $K_c$  від її еквівалентного діаметра  $d_i$ : для статичного деформування (а); ДНП1 (b) та ДНП2 (c) при  $\alpha = 0,1$ .

Fig. 7. Dependence of dimples form  $K_c$  on its equivalent diameter  $d_i$ : for static deformation (a); DNP1 (b) and DNP2 (c) at  $\alpha = 0.1$ .

Округлі ямки відриву утворювались на ділянках структурної неоднорідності, зокрема в околі включень, що супроводжувалось накопиченням локальних деформацій та руйнуванням матеріалу. Укрупнення ямок пов'язане, насамперед,



з переходом до об'ємного напруженого стану, що спричиняє підростання та коалесценцію дефектів з формуванням великих ямок [19]. Вважали, що зміна коефіцієнта округлості  $K_c$  свідчить про локалізацію деформування ямки на мікрорівні внаслідок підростання тріщини, утвореної через їх об'єднання (рис. 7a). Коефіцієнт  $K_c$  вказував на кількість пікселів, які всередині кола, центр якого розташований у центрі мас колового концентратора з еквівалентним діаметром (рис. 7). Виявили, що зі зростанням діаметра ямки коефіцієнт округлості  $K_c$  знижується від 95...90% до 40%.

Дослідження дали змогу описати форму та кількість ямок в'язкого відриву та оцінити вплив виду навантаження на їх формозміну. Вона є підґрунтям оцінювання напружено-деформованого стану в околі кожної окремої ямки [20]. Імпульсні додаткові навантаження на стадіях утворення і росту пор вносять істотні зміни в кінетику накопичення пошкоджень, що, передусім, впливає на стадію злиття пор і на граничну пошкодженість матеріалу [22]. Саме про це свідчать результати аналізу поверхні зразків після ДНП, у яких потоншуються перетинки між порами, зростає пористість.

### ВИСНОВКИ

Запропоновано алгоритм та створено програмне забезпечення, яке дає можливість ідентифікувати ямки відриву на поверхні руйнування, визначити їх розміри та оцінити форму. Крім того, можна встановити частку між'ямкового простору. Алгоритм враховує неоднозначність розпізнавання за зміни значень параметрів алгоритму і дає змогу оцінити можливі відхилення під час визначення розташування країв об'єктів.

Відмінності форми та розмірів ямок відриву дали можливість поглибити опис деформаційних процесів титанового сплаву ВТ23 та пояснити виявлені закономірності макродеформування.

*РЕЗЮМЕ.* Предложен автоматизированный метод анализа формы и размеров ямок вязкого отрыва, образованных при разрушении титанового сплава ВТ23. Метод можно использовать в системах технической диагностики. Разработаны подходы к анализу изображений поверхностей разрушения, полученных на сканирующем микроскопе. Предложенный метод позволяет выделять составные части исследуемых объектов, осуществлять их морфологический анализ, а также оценивать их взаимосвязь.

*SUMMARY.* The automated method for analyzing the shape and dimensions of the viscous tear pits formed during fracture of VT23 titanium alloy is proposed. The method can be used in technical diagnostics systems. The approaches to analyzing images of fracture surfaces obtained with a scanning microscope have been developed. The proposed method makes it possible to distinguish the components of the investigated objects, their morphological analysis, and to evaluate the relationship between them.

1. Ботвина Л. Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов. – М.: Наука, 1989. – 230 с.
2. Масштабные уровни деформации и разрушения теплостойких сталей / П. О. Марущак, С. В. Панин, А. З. Студент, Б. Б. Овечкин. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2013. – 236 с.
3. Ohashi M. Extreme value analysis of ductile fracture surface by dimpled rupture associated with fracture behavior of tensile specimens // J. of Mat. Sci. – 2007. – 42. – P. 9877–9887.
4. Комп'ютерний аналіз характерних елементів фрактографічних зображень / Р. Я. Косаревич, О. З. Студент, Л. М. Свірська, Б. П. Русин, Г. М. Никифорчин // 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, B. P. Rusyn, H. M. Nykyforchyn // Materials Science. – 2013. – 48, № 4. – P. 474–481.)

5. *Automatic characterization of fracture surfaces of AISI 304LN stainless steel using image texture analysis* / S. Dutta, A. Das, K. Barat, H. Roy // *Measurement: J. of the Int. Measur. Confederat.* – 2012. – **45** (5). – P. 1140–1150.
6. *Image segmentation based on the evaluation of the tendency of image elements to form cluster with the help of point field characteristics* / R. J. Kosarevych, B. P. Rusyn, V. V. Korniy, T. I. Kerod // *Cybernetics and System Analysis.* – 2015. – **51**. – P. 704–713.
7. *Реконструкція та кількісний аналіз металевих поверхонь з пітингами на основі удосконаленого методу погодження стереозображень* / Б. П. Русин, Я. Ю. Варецький, Ю. В. Лисак, А. Ю. Похмурський // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2011. – **47**, № 2. – С. 126–133.  
(*Reconstruction and quantitative analysis of metallic surface with pits based on improved stereo image matching method* / B. P. Rusyn, Ya. Yu. Varetskyi, Yu. V. Lysak, A. Yu. Pokhmurskyi // *Materials Science.* – 2011. – **47**, № 2. – P. 255–263.)
8. *Bastidas-Rodriguez M. X., Prieto-Ortiz F. A., and Espejo E. Fractographic classification in metallic materials by using computer vision* // *Eng. Fail. Anal.* – 2016. – **59**. – P. 237–252.
9. *Measurement of nonuniformity of fracture in structural steels with heterogeneous structure* / A. V. Kudrya, E. A. Sokolovskaya, V. A. Trachenko, Le Hai Ning, S. V. Skorodumov, K. B. Papina // *Metal Sci. and Heat Treat.* – 2015. – **57**. – P. 190–196.
10. *Strength analysis of mechanical systems at dynamic non-equilibrium processes* / V. Hutsaylyuk, M. Chausov, V. Berezin, A. Pylypenko // *Eng. Fail. Anal.* – 2013. – **35**. – P. 636–644.
11. *Enhancing plasticity of high-strength titanium alloys VT 22 under impact-oscillatory loading* / M. Chausov, P. Maruschak, A. Pylypenko, and L. Markashova // *Philosophical Magazine.* – 2017. – **97**. – P. 389–399.
12. *Methods and some results of automated analysis of ductile failure mechanisms of titanium alloy VT-22* / P. Maruschak, I. Konovalenko, O. Prentkovskis, M. Chausov, A. Pylypenko // *Proc. Eng.* – 2016. – **134**. – P. 475–480.
13. *Damage and fracture of heat resistance steel under cyclic thermal loading* / P. Yasniy, P. Maruschak, R. Bishchak, V. Hlado, and A. Pylypenko // *Theoret. and Appl. Fract. Mech.* – 2009. – **52** (1). – P. 22–25.
14. *Konovalenko I. V., Pastukh O. A., and Marushchak P. O. Using fuzzy sets to estimate the geometric parameters of surface damage* // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.* – 2016. – **52** (4). – P. 319–327.
15. *Bradley D. and Roth G. Adaptive thresholding using the integral image* // *J. of Graphics Tools.* – 2007. – **12**. – P. 13–21.
16. *Ghajar R., Mirone G., and Keshavarz A. Ductile failure of X100 pipeline steel – experiments and fractography* // *Materials & Design.* – 2013. – **43**. – P. 513–525.
17. *Strnadel B. and Jonšta Z. Distribution of dimple sizes on the fracture surface of spheroidized steel in the transition region* // *Engin. Fract. Mech.* – 1994. – **48**. – P. 863–871.
18. *Effect of long term operation on degradation of material of main gas pipelines* / P. Maruschak, R. Bishchak, I. Konovalenko, A. Menou, J. Brezinová // *Mat. Sci. Forum.* – 2014. – **782**. – P. 279–283.
19. *Benzerga A. A. Micromechanics of coalescence in ductile fracture* // *J. of Mech. and Phys. of Solids.* – 2002. – **50**. – P. 1331–1362.
20. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г. Новые методы оценки деградации механических свойств металлоконструкций в процессе наработки.* – К.: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2004. – 134 с.
21. *Sevostianov I. and Kushch V. I. Effect of pore clusters on the statistics of peak stress and overall properties of porous material* // *J. of Mech. and Phys. of Solids.* – 2009. – **46**. – P. 4419–4429.
22. *Методи покращення механічних властивостей високоміцних листових титанових сплавів* / М. Г. Чаусов, П. О. Марущак, А. П. Пилипенко, К. Г. Лопатько, Ю. А. Герасимчук // *Мат-ли Всеукр. наук.-техн. конф. “Актуальні проблеми проектування, виготовлення і експлуатації озброєння та військової техніки” (17–19 травня 2017 р.).* – Вінниця: ВНТУ, 2017. – С. 325–327.

Одержано 14.03.2017