

ЗАСТОСУВАННЯ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ПРИ ДІАГНОСТИЦІ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

В.В. Усов¹, М.Д. Рабкіна², Н.М. Шкатуляк¹, Н.І. Рибак¹, О.О. Штофель³

¹Південноукраїнський національний педагогічний університет ім. К.Д. Ушинського. 65020, м. Одеса, вул. Старопортофранківська, 26. E-mail: valentinusov67@gmail.com

²ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: marjanara17@gmail.com

³НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37

Показано, що фрактальний аналіз як допоміжний засіб технічної діагностики та неруйнівного контролю дозволяє визначити важливі особливості стану та поведінки елементів металоконструкцій в процесі їх експлуатації та руйнування. Представлено приклади використання фрактальної розмірності зламів для оцінки критичних розмірів крихких тріщин та визначення її впливу на ударну в'язкість, границі плинності, міцності, руйнівний тиск при гідравлічних випробуваннях, а також для виявлення взаємозв'язку фрактальної розмірності із довговічністю після малоциклового втомного руйнування металу зварних з'єднань трубопроводу. Встановлено, що характер фрактальних розмірностей зламів і діаграм залежності прикладеного навантаження від часу при ударних навантаженнях обумовлений напрямком вирізки та температурою випробування зразків. Показано, що основний компонент текстури {001} <110> низьколегованої сталі сприяє збільшенню фрактальної розмірності зламів і крихкому руйнуванню при ударних випробуваннях. Бібліогр. 25, табл. 4, рис. 9.

Ключові слова: ударні випробування, фрактальна розмірність, крихка тріщина, руйнування

Вступ. Надійність довготривалого використання металевих конструкцій в значній мірі залежить від підходів до визначення їх технічного стану, насамперед, методами неруйнівного контролю. Але передчасне руйнування конструкцій може бути обумовлено наявністю невидимих дефектів, які сприяють деградації фізико-механічних властивостей самих матеріалів. Це потребує проведення механічних іспитів зразків, зокрема на відібраних пробах.

Фрактальний аналіз структури металу та деталей металоконструкцій щодо прогнозування їх руйнування виступає на даному етапі в ролі допоміжного методу діагностики експлуатаційного ресурсу. Наприклад, безпечна експлуатація нафтових і газових трубопровідних систем може бути забезпечена, в першу чергу, шляхом вивчення причин руйнування трубопроводів, заснованим на лабораторних дослідженнях основного металу (ОМ) і металу характерних зон зварювальних з'єднань (ЗЗ).

Руйнування сталей пов'язано з такими їх характеристиками, як кристалографічна текстура, макро- і мікроструктура, ферит-перлітна смугастість, частка структурних складових тощо [1, 2]. Експериментальні дослідження впливу зазначених структурних характеристик на закономірності пружно-пластичного деформування, малоциклового втомного руйнування із залученням фізичних

методів досліджень (рентгенографічний і фрактографічний аналізи) є актуальним. Тому застосування фрактального аналізу при дослідженні поверхонь руйнування є нагальним [3].

Назва «фрактал» походить від латинського «Fractus», що означає «дробовий», «ламаний». При вимірі довжини берегової лінії виявилось, що її довжина L залежить від вибору масштабу виміру ℓ за співвідношенням (у логарифмічних координатах – пряма лінія):

$$L \propto \ell^{1-D}, \quad (1)$$

де D – фрактальна розмірність (ФР) [4], яка не збігається із топологічною розмірністю d_i , є дробовою величиною та перевищує топологічну розмірність d_i ($D > d_i$). Наприклад, для берегової лінії Англії $D \approx 1,3$, а для Норвегії $D \approx 1,5$. Величина D тим більша, чим більш порізаним є берег [4]. Виявилось, що структура границь зерен у металевих полікристалах значно впливає на механічні властивості [5]. Відомо, що крихкість металевих матеріалів часто супроводжується міжзеренним руйнуванням [6]. Для запобігання міжзеренного руйнування потрібно зміцнювати межі зерен шляхом збільшення їх звивистості [7]. Характеристикою звивистості меж зерен є фрактальна розмірність.

Методики досліджень. Визначення фрактальної розмірності. Одним із прямих методів

Усов В.В. <https://orcid.org/0000-0001-7855-5370>, Шкатуляк Н.М. <https://orcid.org/000-0003-4905-001X>, Рибак Н.І. <https://orcid.org/0000-0003-2061-0642>, Рабкіна М.Д. <https://orcid.org/0000-0003-3498-0716>, Штофель О.О. <https://orcid.org/0000-0002-0315-5484>

© В.В. Усов, М.Д. Рабкіна, Н.М. Шкатуляк, Н.І. Рибак, О.О. Штофель, 2022

визначення ФР двовимірних зображень (мікрофотографій) поверхні руйнування є метод покриття плоскої кривої квадратними сітками, розміри яких зменшуються в певну кількість разів («box-counting method») [8].

Цей метод не вносить спотворень в об'єкт досліджень. При цьому проводять фрактальний аналіз плоских меж фрагментів поверхні руйнування. Широке застосування цього методу обумовлено тим, що він може бути застосований до будь-якої плоскої конфігурації [9]. Для математичної фрактальної кривої ФР збігається з хаусдорфовою розмірністю (ХР). Проте аналітичний розрахунок ФР є досить трудомістким і можливий лише у деяких випадках. Показано, що фрактальна розмірність, знайдена за допомогою «box-counting method» у разі динамічних систем, має те саме значення, що й розмірність Хаусдорфа [9].

Для визначення фрактальної розмірності потрібно охопити зображення елементарними квадратними сітками зі сторонами ℓ_i [9]. На кожному етапі одну й ту саму криву покривають клітинками зменшеного масштабу. Чим менший розмір клітинки, тим точніше відтворюється крива. В той же час підраховують кількість квадратів $N(\ell_i)$, що перетинає крива. Потім змінюють розмір вікна сітки ℓ_i . Знову підраховують кількість квадратів, що перетинає крива: $N(\ell_2), N(\ell_3) \dots N(\ell_n)$. Кількість квадратів $N(\ell_i)$, які перетинала крива, пов'язана з розміром вікна сітки ℓ_i залежністю [9]:

$$N(\ell) = \alpha^{\ell^{-D}} \quad (2)$$

де $\lg N(\ell_i) = f(\lg \ell_i)$, $D = \lim_{\ell \rightarrow 0} \frac{\lg N(\ell)}{\lg(1/\ell)}$ за визначенням зазвичай називається фрактальною розмірністю або розмірністю Хаусдорфа-Безиковича [9]. Практично D визначають за тангенсом кута нахилу графічної залежності $\lg N(\ell_i) = f(\lg \ell_i)$ [9]. Для визначення фрактальної розмірності зручно застосувати комп'ютерне програмне забезпечення HarFA («Harmonic and Fractal Image Analysis»), яке є у вільному доступі [10]. Перед визначенням фрактальної розмірності фотографії зламів зазвичай очищають від фону, наприклад, за допомогою комп'ютерного програмного забезпечення ACDSeePhotoStudioSoftware [11], для того, щоби отримати тільки лінії меж фрагментів руйнування (рис. 1).

Фрактальний аналіз крихких зламів. Досліджували [12] фрактальну розмірність зразків сталі контрольованої прокатки (Fe, 0,11 % C, 1,58 % Mn, 0,38 % Si) завтовшки 20 мм після випробувань на ударний вигин при температурах від кімнатної до -110 °С, а також визначали ФР дроту алюмінієвого сплаву АД1 після втомних випробувань на симетричний вигин при кімнатній температурі та при -10 °С.

Поверхні зламів досліджено на мікрорівні по мікрофрактограмах, отриманих на растровому електронному мікроскопі РЕМ-200 при збільшенні 20000, а на мезорівні – за оптичними мікрофотографіями (МІМ-7, збільшення 350).

У зламах зразків сталі частка поверхні з крихким руйнуванням складала 35 % при кімнатній

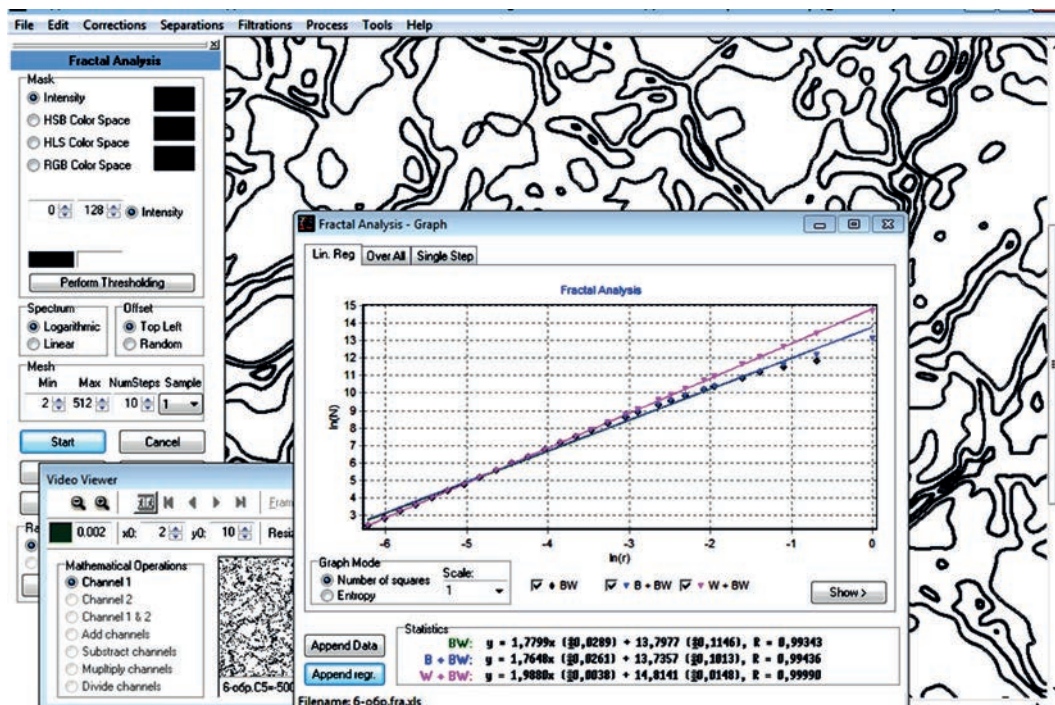


Рис. 1. Приклад визначення ФР зламу зразка сталі марки 20К після ударного випробування за Шарпі з використанням комп'ютерного програмного забезпечення HarFA та ACDSeePhotoStudioSoftware

температурі і 55 % при $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. У зламах алюмінію «крихка» частка збільшувалася від 50 до 65 % при зниженні температури від 20 до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Типова мікрофотографія крихкого зламу сталі показана на рис. 2. Визначали фрактальну розмірність меж нумерованих ділянок.

Встановлено, що злами після крихкого руйнування мають середні значення ФР $1,20 \pm 0,06$ та $1,15 \pm 0,06$ для сталі та алюмінію відповідно. На основі припущення, що у відповідності до критерію Гриффітса при збільшенні розміру тріщини на ΔR виділяється пружна енергія, що дорівнює приросту поверхневої енергії розрізу [13], було отримано залежність для оцінки критичних розмірів крихких тріщин:

$$R^{2-D} \approx \frac{2\gamma DE}{\sigma^2} \quad (3)$$

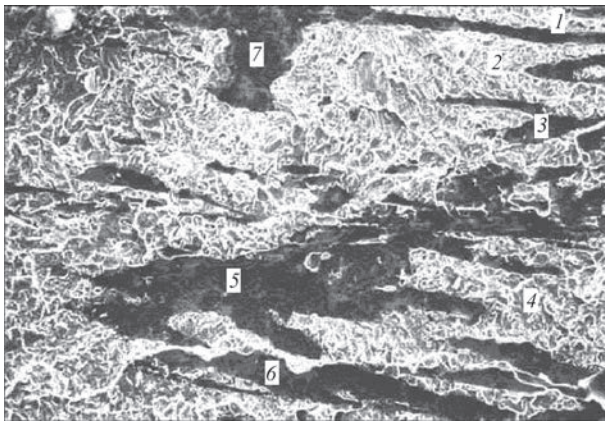
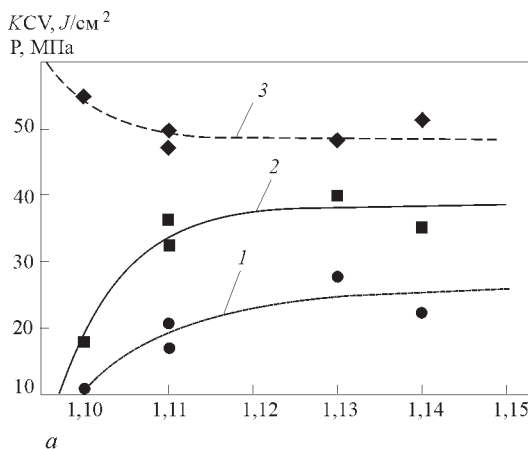


Рис. 2. Електронна мікрофрактограма шарувато-крихкого руйнування сталі після випробувань на ударний вигин

Таблиця 1. Хімічний склад металу досліджених балонів, мас. %

Номер	Термін експлуатації, роки	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	C _{екв.}
Б1	45	0,513	1,01	0,319	0,023	0,023	0,14	0,11	0,72
Б2	52	0,467	0,85	0,247	0,023	0,022	0,11	0,07	0,64
Б3	18	0,490	0,88	0,255	0,019	0,026	0,23	0,10	0,69
Б4	36	0,442	0,90	0,366	0,014	0,017	0,11	0,11	0,62
Б5	49	0,482	0,72	0,257	0,026	0,019	0,10	0,08	0,63



де E – модуль пружності матеріалу, а $\gamma \approx 1$ – питома поверхнева енергія [14].

Підстановка у (3) даних випробувань досліджуваної сталі при $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($D_{cp} = 1,2$; $E = 220\text{ ГПа}$ [14], $\sigma \approx 100\text{ МПа}$) дала величину критичного розміру фрактальної тріщини $R \approx 4,5\text{ мкм}$, що відповідає середньому розміру комірчастої дислокаційної структури сталі [1] та добре узгоджується з шарувато-крихким руйнуванням за механізмом крихкого транскристалітного відколу (рис. 2).

Аналогічна оцінка для крихкого руйнування алюмінію при $D_{cp} \approx 1,15$, $E = 70\text{ ГПа}$ [15] і $\sigma \approx 20\text{ МПа}$ (по ударної в'язкості [15]) дала $R \approx 6,75\text{ мкм}$.

Фрактальна розмірність меж зерен і механічні властивості металу кисневих балонів. Під робочим тиском 14,7 МПа досліджували кисневі балони ємністю 40 л зі сталі Дс (ГОСТ 949-73) різного терміну експлуатації [16].

Фрактальна розмірність меж зерен сталі Дс кисневих балонів різних термінів експлуатації від 18 до 52 років змінюється від 1,10 до 1,14. Встановлено кореляційні зв'язки фрактальної розмірності меж зерен з ударною в'язкістю, руйнівним тиском і межею плинності з коефіцієнтами кореляції R не нижче 0,80 (рис. 3).

Криві на рис. 3 відповідають рівнянням регресії з високим ступенем кореляції R :

$$KCV(-10\text{ }^{\circ}\text{C}) = (-1,14 \cdot 10^4 + 26,03 D_{cp}^{93,98}) / (32,14 + D_{cp}^{93,98}); R = 0,92 \quad (4)$$

$$KCV(20\text{ }^{\circ}\text{C}) = (-1,30 \cdot 10^5 + 38,29 D_{cp}^{164,73}) / (820,64 + D_{cp}^{164,73}); R = 0,96 \quad (5)$$

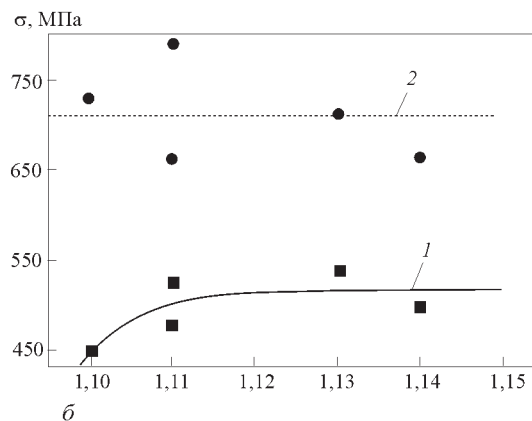


Рис. 3. Кореляційні зв'язки середньої ФР D_{cp} границь зерен: а – з ударною в'язкістю KCV при $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (крива 1) і $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (крива 2), руйнівним тиском (крива 3); б – з границями плинності $\sigma_{0,2}$ (крива 1) й міцності σ_b (крива 2)

$$P(20\text{ }^\circ\text{C}) = (5,34 \cdot 10^{-3} + 2,28 \cdot 10^4 D_{\text{cp}}^{-184,77}) / ((1,10 \cdot 10^{-4} + D_{\text{cp}}^{-184,77})); R = 0,80 \quad (6)$$

$$\sigma_{0,2} = (-1,53 \cdot 10^8 + 5,18 \cdot 10^2 D_{\text{cp}}^{152,92}) / (8,09 \cdot 10^2 + D_{\text{cp}}^{152,92}); R = 0,80 \quad (7)$$

Кореляційний аналіз межі міцності σ_B металу балонів засвідчив відсутність її зв'язку з ФР границь зерен. Рівняння регресії має вигляд:

$$\sigma_B = 710,28; R = 0,02. \quad (8)$$

Фрактальні особливості малоциклового втомного руйнування (МЦУ) металу зварних з'єднань трубопроводу. Лабораторні зразки для експериментального визначення основних закономірностей циклічного пружно-пластичного деформування основного металу (ОМ) та металу характерних зон зварного з'єднання – зони термічного впливу (ЗТВ) та металу шва (МШ) – вирізали в поперечному напрямку труби діаметром 530×8 мм магістрального трубопроводу зі сталі 17Г1С-У після тривалої експлуатації [17]. На рис. 4 наведено зруйнований зразок після випробувань на розтяг, на якому показано ділянки дослідження текстури.

На рис. 5–7 представлені фото зламів зразків, ОМ, МШ та ЗТВ відповідно, після випробування на МЦУ. Проведений фрактографічний аналіз показав відмінності в механізмах руйнування зразків, вирізаних із ОМ (рис. 5) та металу характерних зон СС після випробувань на МЦУ.

Для зразків, вирізаних із ОМ, має місце квазікрихке руйнування з утворенням вторинних трищин розшарування. Цьому сприяє кристалографічна текстура ОМ $\{001\} \langle 110 \rangle$. Розшарування може здійснюватися по площинах відколу $\{001\}$.

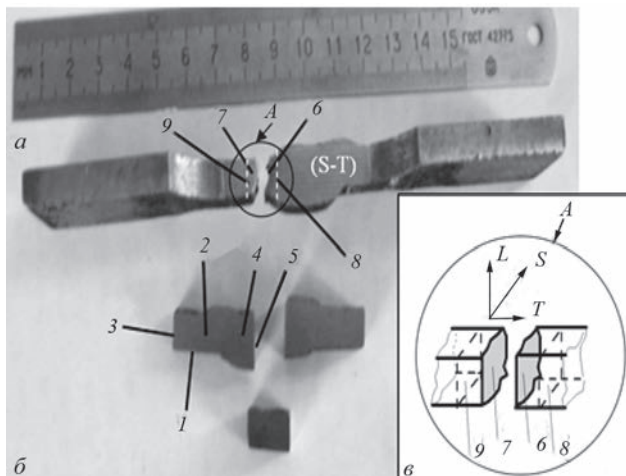


Рис. 4. Ділянки дослідження текстури: а – недеформована ділянка (1 – ОМ в площині прокатки LT; 2, 3 – ОМ в площинах ST і SL; 4, 5 – перетини МШ в площинах ST і SL); б – після руйнування (6, 7 – зв'язані поверхні руйнування МШ; 8, 9 – перетини МШ в площині SL під зламами); в – схема фрагмента А з рис. 3, б; L – поздовжній напрям; T – поперечний напрям; S – напрям, перпендикулярний напрямом L і T

Зразки, вирізані з МШ (рис. 6), руйнуються за механізмом утворення ямок (в'язке руйнування). Цьому сприяє текстура зсуву МШ типу $\{110\} \langle 001 \rangle$, який є основним. Це відображається на

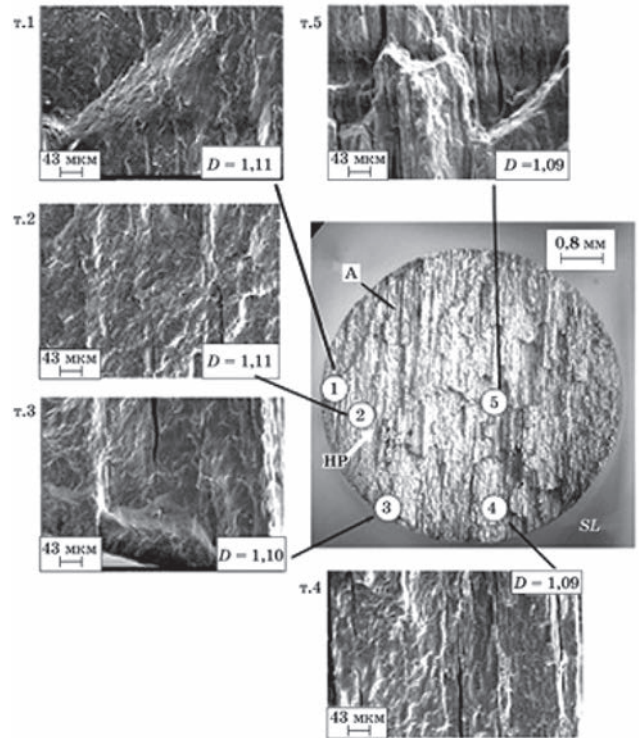


Рис. 5. Злам зразка з ОМ після випробувань на МЦУ: а, б – вид фрагмента зруйнованого зразка в площині (L-T) і (L-S) відповідно; в – злам з типовим макро- (А) та мікрорельєфом (т.т. 1–5) руйнування; HP – напрямок руйнування; D – фрактальна розмірність

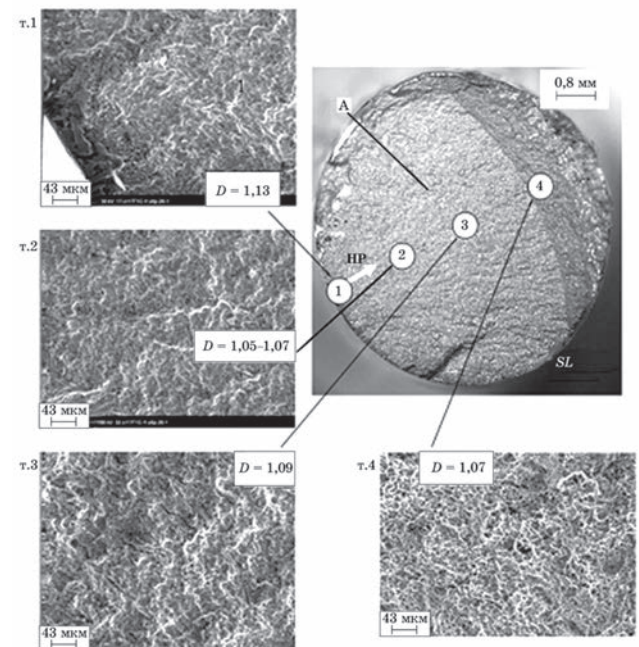


Рис. 6. Злам зразка з ділянки МШ після випробувань на МЦУ: а, б – вид фрагмента зруйнованого зразка в площині (L-T) та (L-S) відповідно; в – злам з типовим макро- (А) та мікрорельєфом (т.т. 1–4) руйнування; HP – напрямок руйнування; D – фрактальна розмірність

зменшенні величини ФР у порівнянні зі зломом ОМ (рис. 5).

Квазікрихке руйнування спостерігається для зразків ЗТВ, але меншою мірою у порівнянні з ОМ, оскільки формується кристалографічна текстура розтягу – стиску $\langle 001 \rangle - \langle 110 \rangle$, обумовлена деформуванням ковзанням по системах $\{110\} \langle 110 \rangle$ і $\{110\} \langle 111 \rangle$ [17]. Причому на мікрофрактограмах ЗТВ зустрічаються ділянки з борозенками. Величина ФР є близькою до її значень для зламу зразка з ОМ (рис. 5).

На рис. 5 видно, що фрактальна розмірність у різних ділянках зламу з ОМ змінюється від 1,09 до 1,11, середня величина фрактальної розмірності поверхні зламу основного металу складала $D_{cp} = 1,10 \pm 0,01$. Аналогічні результати показав аналіз фрактальної розмірності зламу зразка із металу ЗТВ. На рис. 7, в видно, що фрактальна розмірність у різних ділянках зламу ЗТВ змінюється від 1,07 до 1,15, так що середня величина фрактальної розмірності поверхні зламу зразка ЗТВ металу складала $D_{cp} = 1,11 \pm 0,01$.

Більш в'язкий характер руйнування зразка МШ впливає з аналізу рис. 5 та текстури. При цьому фрактальна розмірність на різних ділянках зламу зразка МШ змінюється від 1,05 до 1,13 (рис. 6, в), а середня величина фрактальної розмірності МШ складала $D_{cp} = 1,08 \pm 0,01$.

З ймовірністю 0,95 можна стверджувати, що середнє значення під час вибірки більшого обсягу не вийде за межі зазначених вище інтервалів.

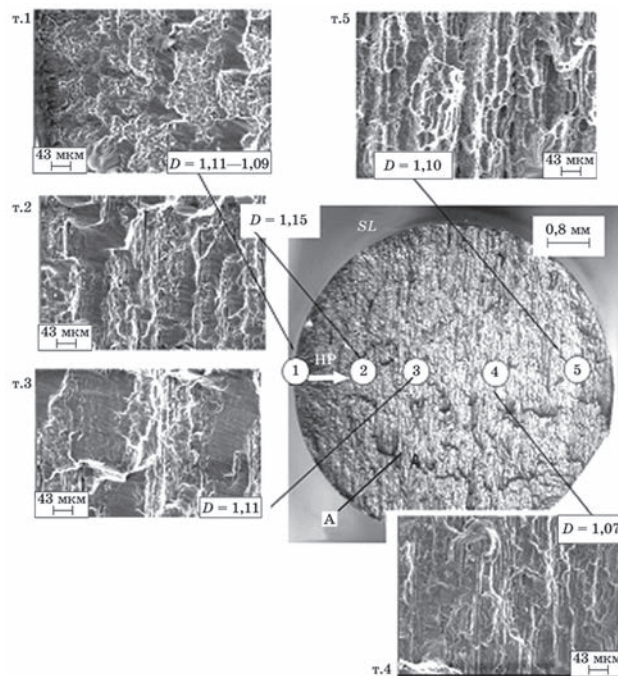


Рис. 7. Злам зразка з ділянки ЗТВ після випробувань на МЦУ: а, б – вид фрагмента зруйнованого зразка в площині (L-T) та (L-S) відповідно; в – злам з типовим макро- (А) та мікрорельєфом (т.т. 1–5) руйнування; НР – напрямок руйнування; D – фрактальна розмірність

Таким чином, простежується тенденція збільшення фрактальної розмірності при переході від в'язкого (МШ) до квазікрихкого характеру руйнування (ОМ та ЗТВ), що відповідає зниженню відповідних показників міцності та пластичності при статичних випробуваннях та зменшенню довговічності. Збільшення фрактальної розмірності при квазікрихкому руйнуванні може означати, що при квазів'язкому руйнуванні поверхня більше «розтягується» внаслідок наявності ширших і глибших мікропор. На мікроскопічному рівні поверхня стає гладкішою [18].

Збільшення фрактальної розмірності зламів досліджуваної нами сталі при переході від в'язкого до квазікрихкого руйнування узгоджується з результатами роботи [18] та іншими більш ранніми дослідженнями. У [18] наведено, що сталь показує зменшення фрактальної розмірності зі збільшенням в'язкості. Так, при дослідженні [18] 24-х серій зразків сталі AISI 4340 було показано, що фрактальна розмірність зламу зразка сталі з часткою поверхні з в'язким руйнуванням 36 % складала $D \approx 1,28$. При збільшенні частки в'язкої складової у зламі до 50 % $D \approx 1,25$. При частці в'язкої складової у зламі 77 % $D \approx 1,20$. При 100 % в'язкому зламі $D \approx 1,10 \dots 1,09$.

Слід зазначити, що характеристика поверхонь руйнування за допомогою вищезгаданих середніх значень фрактальних розмірностей ЗМ, ЗТВ та МШ є спрощеною. Наявність різних значень фрактальних розмірностей у різних ділянках відповідних зламів вказує на те, що досліджувані поверхні є мультифракталами, які можна інтерпретувати як нерозривні суміші простих фракталів [17]. Кожен з них характеризується своєю фрактальною розмірністю, а весь відповідний злам описується нескінченною множиною фрагментів руйнування, пов'язаних з різною ймовірністю реалізації різних фрагментів множини. Ймовірність P_i реалізації кожного фрагмента визначається співвідношенням:

$$P_i = \ell_i^\alpha, \quad (9)$$

де α – скейлінговий параметр, $i = 1, 2, \dots, N_n$ – число фрагментів множини [17].

Для детальнішого опису таких поверхонь руйнування потрібно застосування мультифрактального підходу [17, 19, 20], що може бути темою майбутніх досліджень.

Анізотропія енергії руйнування при ударних випробуваннях і фрактальна розмірність. Визначали параметри ударної в'язкості та фрактальні розмірності кривих навантаження в залежності від часу випробувань та відповідних зламів при випробуваннях на ударний вигин зразків V-Шарпі, вирізаних у різних напрямках з листів сталі 20К в діапазоні температур від -50 до 50 °C [21]. Ударні

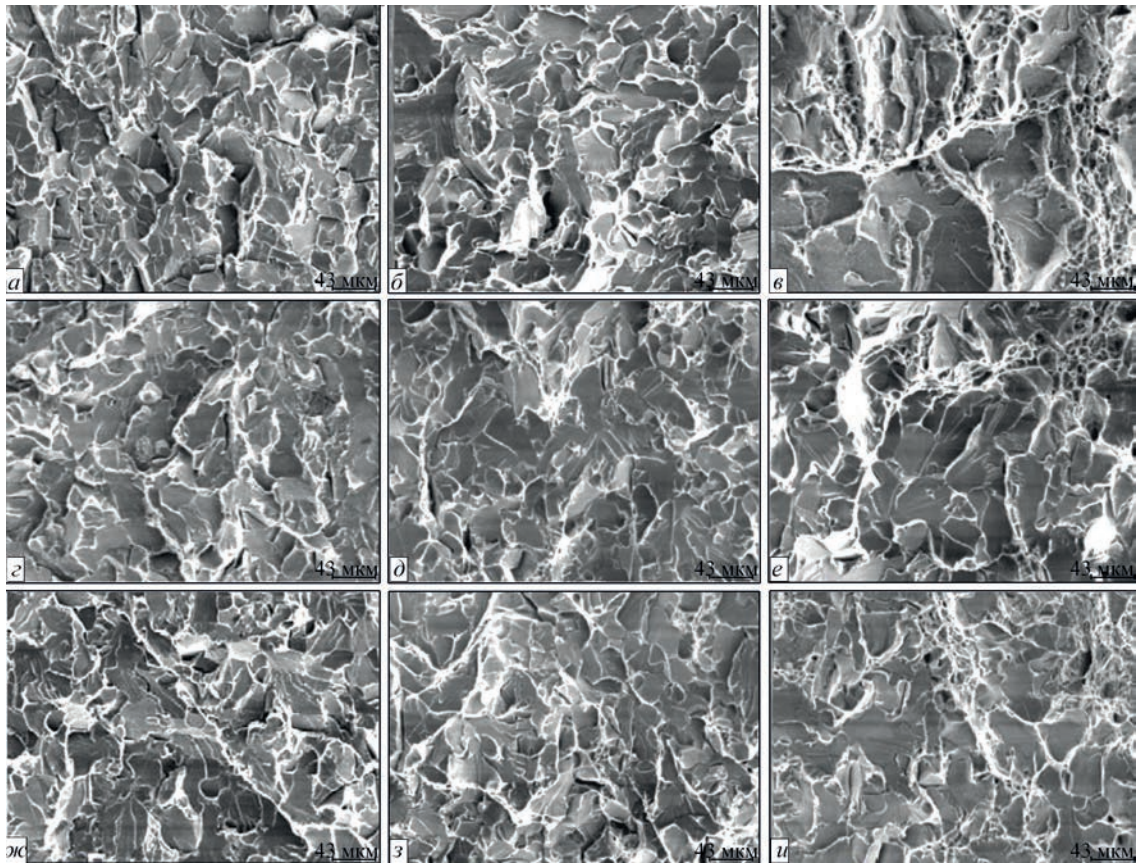


Рис. 8. РЕМ фотографії зламів після ударних випробувань зразків сталі марки 20К. Довжина масштабної лінійки 43 мкм

випробування були виконані на спеціалізованому вертикальному копрі, забезпеченому високошвидкісною системою реєстрації деформацій та зусиль [22]. Стандартні зразки з V-подібним надрізом були вирізані у трьох напрямках: поздовжньому, поперечному та під кутом 45° до поздовжнього напрямку. Випробування проводилися для трьох температур: -50 °С, 50 °С та кімнатної по три зразки кожного напрямку вирізки на кожен температуру. За результатами випробувань було отримано діаграми зміни зусилля від часу $P(t)$ та розраховано значення ударної в'язкості за методикою, наведеною в стандарті ISO 14556-2000 [23]. На рис. 8 представлено мікрофрактограми зламів, отриманих на електронному растровому мікроскопі РЕМ-200. Результати визначення фрактальної розмірності D_f відповідних зламів представлено в табл. 2. На рис. 9 показано діаграми $P(t)$ зміни зусилля з часом випробування зразків на ударний вигін. Результати визначення фрактальної розмірності D_c відповідних діаграм представлено в табл. 3.

Як видно з табл. 2, 3, поведінки фрактальних розмірностей D_f і D_c є подібними. Обидві ФР мають

Таблиця 2. Фрактальна розмірність (D_f) зламів (рис. 8)

$T, ^\circ\text{C}$	НП	ПН	ДН	Середнє D_f
-50	1,59 ± 0,01	1,60 ± 0,01	1,64 ± 0,01	1,61 ± 0,01
20	1,55 ± 0,01	1,56 ± 0,01	1,59 ± 0,01	1,57 ± 0,01
50	1,52 ± 0,01	1,54 ± 0,01	1,55 ± 0,01	1,54 ± 0,01

максимальні значення у діагональному напрямку. Мінімальні значення спостерігаються при підвищеній температурі випробувань +50 °С (табл. 2, 3).

У той же час ударна в'язкість при температурі випробування + 50 °С максимальна (табл. 4).

Це свідчить про в'язкий характер руйнування при 50 °С. Максимальні значення фрактальних розмірностей мають місце при низькій температурі випробування -50 °С (табл. 2, 3). За тієї ж температури має місце мінімальне значення ударної в'язкості (табл. 1), яке відповідає крихкому характеру руйнування досліджуваних зразків при -50 °С.

Максимальні значення фрактальних розмірностей спостерігаються для зразків, вирізаних у діагональному напрямі (ДН), тобто, має місце анізотропія ФР (табл. 2, 3). Ця анізотропія може бути викликана текстурою. Встановлено, що основним компонентом текстури досліджуваної сталі є $\{001\} \langle 110 \rangle$. Цей компонент є типовим компонентом текстури прокатки ОЦК-сталей [24]. В цьому випадку кристалографічні площини $\{001\}$, що є площинами крихкого відколу в ОЦК-металах

Таблиця 3. Фрактальна розмірність (D_c) діаграм $P(t)$ (рис. 9)

$T, ^\circ\text{C}$	НП	ПН	ДН	Середнє D_c
-50	1,27 ± 0,01	1,23 ± 0,01	1,31 ± 0,01	1,27 ± 0,01
20	1,23 ± 0,01	1,17 ± 0,01	1,26 ± 0,01	1,22 ± 0,01
50	1,12 ± 0,01	1,13 ± 0,01	1,16 ± 0,01	1,14 ± 0,01

Таблиця 4. Питома енергія руйнування (Дж/м²) при ударних випробуваннях

Номер зразка	-50 °С	20 °С	50 °С
Повздожній напрямок LD			
1	0,83	5,04	22,87
2	0,73	4,31	20,82
Середнє значення	0,78	4,67	21,84
Поперечний напрямок TD			
1	0,97	9,88	47,95
2	0,95	10,91	57,95
Середнє значення	0,96	10,39	52,95
Діагональний напрямок DD (LD +45°)			
1	0,85	13,33	47,24
2	0,91	17,70	54,65
Середнє значення	0,88	15,51	50,94

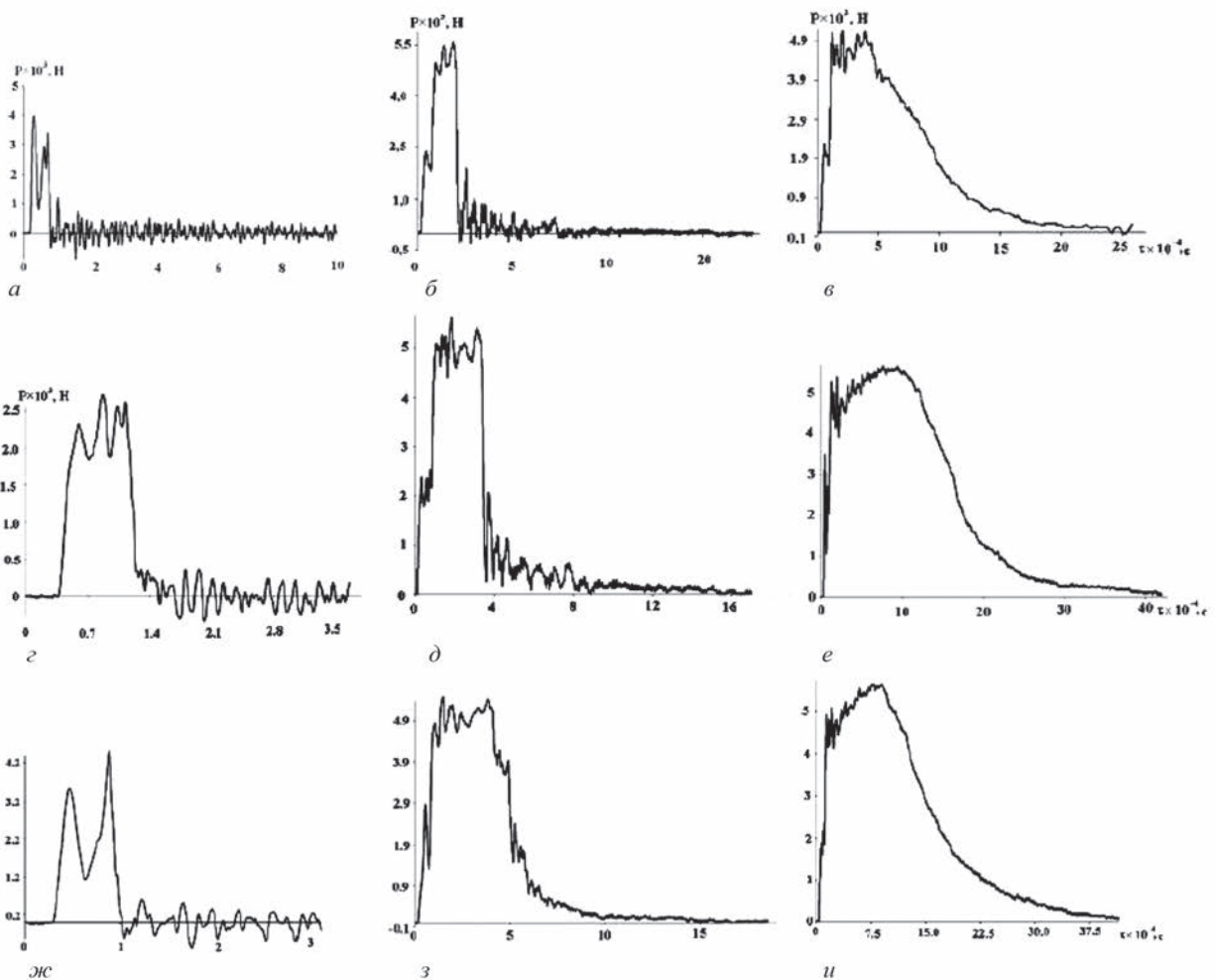


Рис. 9. Діаграми залежності прикладеного навантаження P від часу t при ударних випробуваннях на вигин

[25], розташовані перпендикулярно до діагонального напрямку. Відкол може відбуватися вздовж цих кристалографічних площин, що сприяє більш крихкому характеру руйнування діагональних зразків і проявляється у збільшенні фрактальної розмірності.

Висновки

1. Конфігурації крихких тріщин сталі контрольного вальцювання та алюмінію АД1 є фрактальними, а крихке руйнування має фрактальну

природу. На підставі фрактальної моделі крихкої тріщини оцінено її критичні розміри R . Для дослідженої сталі $R \approx 4,5$ мкм, що відповідає середньому розмірові комірок її дислокаційної структури. Для алюмінію АД1 критичний розмір крихкої тріщини $R \approx 6,75$ мкм.

2. При гідровипробуваннях кисневих балонів зі сталі Дс мають місце тісні кореляційні зв'язки між фрактальною розмірністю меж зерен металу балонів з одного боку, ударною в'язкістю, руйнівним тиском при гідровипробуваннях та умов-

ною межею плинності з коефіцієнтами кореляції не нижче 0,80 з іншого боку. Низька фрактальна розмірність меж зерен відповідає більшому розміру зерен, низьким значенням ударної в'язкості та межі плинності, але високому руйнівному тиску при гідровипробуваннях. Зростання фрактальної розмірності меж зерен супроводжується зростанням ударної в'язкості, межі плинності та зниженням руйнівного тиску. Відповідні кореляційні залежності мають вигляд кривих, що досягають насичення із зростанням фрактальної розмірності кордонів. Зі зростанням фрактальної розмірності меж зерен відбувається перехід від крихкого транс-кристалітного відколу до квазивідколу та в'язко-крихкого характеру руйнування.

3. Збільшення частки пластичної деформації металу в зоні термічного впливу загальної амплітуди деформації при випробуваннях на малоциклово втому зразків характерних зон зварного з'єднання трубопроводу зі сталі 17Г1С-У після його тривалої експлуатації призводить до істотного зниження циклічної довговічності основного металу та металу шва. Існують істотні відмінності в механізмах руйнування: зразки з металу шва руйнуються за механізмом утворення ямок (в'язке руйнування) на відміну від квазікрихкого руйнування з утворенням вторинних тріщин розшарування, характерних для основного металу та, меншою мірою, для зони термічного впливу. Це супроводжується збільшенням середньої фрактальної розмірності від $1,08 \pm 0,01$ для в'язкого руйнування металу зварного шва до $1,10 \pm 0,01$ для основного металу та $1,11 \pm 0,01$ для зони термічного впливу при квазікрихкому характері руйнування. Простежується взаємозв'язок між фрактальною розмірністю зламів та довговічністю випробуваних зразків. Зі зменшенням довговічності збільшується значення фрактальної розмірності.

4. Фрактальні розмірності діаграми D_c випробувань $P(t)$, що відображають залежність прикладеного навантаження P від часу t , та фрактальні розмірності зламів D_f після ударних випробувань зразків зі сталі 20К у діапазоні температур від -50 до 50 °С мають аналогічний характер. Максимальні середні значення обох фрактальних розмірностей відповідають крихкому характеру руйнування та мінімальній ударній в'язкості. Мінімальні середні значення обох фрактальних розмірностей відповідають в'язкому характеру руйнування та максимальній ударній в'язкості. Найбільші значення фрактальної розмірності, знайдені для зразків, вирізаних під кутом 45° до поздовжнього напрямку, обумовлені впливом текстурного компонента $\{001\} \langle 110 \rangle$, який є основним компонентом низьколегованої текстури

сталі з ОЦК-решіткою. Представлені результати можуть бути використані для оцінки схильності сталі до крихкого руйнування шляхом аналізу енергії руйнування та фрактальної розмірності діаграм залежності навантаження від часу при випробуваннях на ударну в'язкість.

Список літератури/References

1. Usov V.V., Girenko V.S., Rabkina M. D. et al. (1993) Effect of the crystallographic texture on the anisotropy of fracture characteristics of control-rolled low-alloy steel. *Materials Science*, 29 (2) 146–150. <http://lib.gen.in/d55dae53541a8dc954b7f4d30d0a34cf.pdf>
2. Лякишев Н.П., Эгиз И.В., Шамрай В.М. (2000) Текстура и кристаллографические особенности разрушения материала труб из стали X70. *Металлы*, 2, 68–72. <http://www.imet.ac.ru/metally/numbers.htm>
Lyakishev, N.P., Egiz, I.V., Shamraj, V.M. (2000) Texture and crystallographic peculiarities of fracture of steel X70 pipe material. *Metally*, 2, 68–72 [in Russian]. <http://www.imet.ac.ru/metally/numbers.htm>
3. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксагоев А.А. (1994) *Синергетика и фракталы в материаловедении*, Москва, Наука. https://www.researchgate.net/publication/268999858_Sinergetika_i_fraktaly_v_materialovedenii
Ivanova, V.S., Balankin, A.S., Bunin, I.Zh., Oksagoev, A.A. (1994) *Synergy and fractals in materials science*. Moscow, Nauka [in Russian]. https://www.researchgate.net/publication/268999858_Sinergetika_i_fraktaly_v_materialovedenii
4. Мандельброт Б. (2002) *Фрактальная геометрия природы*. Москва, Институт компьютерных исследований. <https://ruwapa.net/book/benua-mandelbrot-fraktalnaya-geometriya-prirody/>
Mandelbrot, B. (2002) *Fractal geometry of nature*. Moscow, Institute for Computer Research. <https://ruwapa.net/book/benua-mandelbrot-fraktalnaya-geometriya-prirody/>
5. Watanabe, T., Tsurekawa, S. (2004) Toughening of brittle materials by grain boundary engineering. *Mater. Sci. Engng. A.*, 387–389, 447–455. https://www.researchgate.net/publication/222146139_Toughening_of_Brittle_Materials_by_Grain_Boundary_Engineering
6. Vitek, V., Chen, S.P., Voter, A.F. et al. (1989) Grain boundary structure and intergranular fracture in L12 ordered alloys. *Mater. Sci. Forum*, 46, 237–252. <https://www.scientific.net/MSF.46.23>
7. Watanabe, T. (1993) Grain boundary design and control for high temperature materials. *Mater. Sci. Engng. A.*, 166, 11–28. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/092150939390306Y>
8. Zhou, H.W., Xie, H. (2003) Direct estimation of the fractal dimensions of a fracture surface of rock. *Surface Review and Letters*, 10(5), 751–762. <https://paperzz.com/doc/9119828/direct-estimation-of-the-fractal-dimensions-of-a>
9. Lucas, M.A. (2012) *Foundations of Measurement Fractal Theory for the Fracture Mechanics Applied*. In *Fracture Mechanics*, Edited by Alexander Belov. <https://www.intechopen.com/chapters/41469>
10. Harfa: download. http://www.fch.vut.cz/lectures/imagesci/includes/harfa_download.inc.php
11. ACDSce Professional 2019. <https://www.acdsee.com/en/products/photo-studio-professional>
12. Usov, V.V., Shkatulyak, N.M. (2005) Fractal Nature of the Brittle Fracture Surfaces of Metal. *Materials Science*, 41(1), 62–66. https://www.researchgate.net/publication/226818869_Fractal_Nature_of_the_Brittle_Fracture_Surfaces_of_Metal
13. Мосолов А.Б. (1991) Фрактальная гриффитсова трещина. *Журн. техн. физ.*, 64(7), 57–60. <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/24666>

- Mosolov, A.B. (1991) Fractal Griffith crack. *Zhurn. Tekh. Fiz.*, 64, (7), 57–60 [in Russian]. <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/24666>
14. Хоникомб Р. (1962) *Пластическая деформация металлов*. Москва, ИЛ. <https://ua1lib.org/book/2433166/2721d7>
 15. Бернштейн М.Л., Займовский М.А. (1979) *Механические свойства металлов*. Москва, Металлургия. <https://ua1lib.org/book/2720875/410310>
 16. Usov, V.V., Rabkina, M.D., Shkatulyak, N.M., Cherneva, T.S. (2015) Fractal dimension of grain boundaries and mechanical properties of the metal of oxygen cylinder. *Material science*, 50(4), 612–620. https://www.researchgate.net/publication/276456141_Fractal_Dimension_of_Grain_Boundaries_and_Mechanical_Properties_of_the_Metal_of_Oxygen_Cylinders
 17. Usov, V.V., Gopkalo, E.E., Shkatulyak, N.M. et al. (2015) Texture, Microstructure, and Fractal Features of the Low Cycle Fatigue Failure of the Metal in Pipeline Welded Joints. *Russian Metallurgy (Metally)*, 9, 759–770. https://www.researchgate.net/publication/289569432_Texture_microstructure_and_fractal_features_of_the_low-cycle_fatigue_failure_of_the_metal_in_pipeline_welded_joints
 18. Carney, L.R., Mecholsky, J.J. (2013) Relationship between fracture toughness and fracture surface fractal dimension in AISI 4340 steel. *Mater. Sci. Applicat.*, 4(4), 258–267. <http://dx.doi.org/10.4236/msa.2013.44032>
 19. Glushkov, A., Khetselius, O., Brusentseva, S., Duborez, A. (2014) Modeling chaotic dynamics of complex systems with using chaos theory, geometric attractors, quantum neural networks. *Proc Int. Geom. Center*, 7(3), 87–94, [http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/2938/1/%D0%93%D0%BB%D1%83%D0%A5%D0%B5%D1%86%D0%91%D1%80%D1%83%D0%94%D1%83%D0%B1Pm_gc_2014_7_3_13%20\(1\).pdf](http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/2938/1/%D0%93%D0%BB%D1%83%D0%A5%D0%B5%D1%86%D0%91%D1%80%D1%83%D0%94%D1%83%D0%B1Pm_gc_2014_7_3_13%20(1).pdf)
 20. Glushkov, A.V., Buyadzhi, V.V., Ternovsky, V.B. et al. (2018) A chaos-dynamical approach to analysis, processing and forecasting measurements data of the chaotic quantum and laser systems and sensors. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 15(4) 41–49, <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/4481/1/2018%20T15%20%234%20CEMST.pdf>
 21. Usov, V., Rabkina, M., Shkatulyak, N. et al. (2020) Anisotropy of Fractal Dimensions of Fractures and Loading Curves of Steel Samples During Impact Bending. *Material Science*, 17(4), 142–151. <http://ijmse.iust.ac.ir/article-1-1680-en.pdf>
 22. Kondryakov, E.A., Zhmaka, V.N., Kharchenko, V.V. et al. (2005) System of Strain and Load Measurement in Dynamic Testing of Materials. *Strength Mater*, 37, 331–335. <https://doi.org/10.1007/s11223-005-0046-6>
 23. *Сталь. Испытание на ударную прочность по Шарпу образцов с V-образным надрезом. Инструментальный метод испытания*. <http://rossert.narod.ru/alldoc/info/2z77/g39315.html>
 24. Winston, R. (Editor) (2015) *Oil and Gas Pipelines: Integrity and Safety*, Handbook. <https://www.worldcat.org/title/oil-and-gas-pipelines-integrity-and-safety-handbook/oclc/904715784>
 25. Pineau, A., Benzerger, A.A., Pardoen, T. (2016) Failure of metals I: Brittle and ductile fracture. *Acta Materialia*, 107, 424–483. <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10019128Pineau>

APPLICATION OF FRACTAL ANALYSIS IN DIAGNOSTICS OF TECHNICAL CONDITION OF METAL STRUCTURE ELEMENTS

V.V. Usov¹, M.D. Rabkina², N.M. Shkatulyak¹, N.I. Rybak¹, O.O. Stofel³

¹K.D. Ushinskii South-Ukraine National Pedagogical University, 26 Staroportofrankivska Str., 65020, Odessa, Ukraine. E-mail: valentinusov67@gmail.com

²E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU, 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: marjanara17@gmail.com

³National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohy Ave., 03056, Kyiv, Ukraine

It is shown that fractal analysis, as an additional tool of technical diagnostics and non-destructive testing, allows determination of the most important features of the state and behaviour of metal structure elements during their operation and failure. Examples of application of fractal dimension of the fractures are presented to assess the critical dimension of brittle cracks and to determine its effect on impact toughness, yield limit, ultimate strength, and destructive pressure at hydraulic testing, and to detect the interrelation of fractal dimension with fatigue life after low-cycle fatigue fracture of metal of pipeline welded joints. It is found that the nature of fractal dimensions of the fractures and diagrams of time dependence of the applied load at impact loading is due to the direction of cutting and temperature of testing the samples. It is shown that the main component of {001} <110> texture of low-alloyed steel promotes an increase of fractal dimension of the fractures and development of brittle fracture at impact testing. Ref. 25, Tabl. 4, Fig. 9.

Keywords: impact testing, fractal dimension, brittle crack, destruction

Надійшла до редакції 16.12.2021

Materials, methods and technologies

24th International Conference

19-22 August, 2022

Burgas, Bulgaria

<http://bit.ly/2Aa6Jk3>

