

С.Є. Донець<sup>1</sup>, В.В. Литвиненко<sup>1</sup>, О.А. Старцев<sup>1</sup>, Ю.Ф. Лонін<sup>2</sup>, А.Г. Пономарьов<sup>2</sup>,  
В.Т. Уваров<sup>2</sup>

## Фрактальний аналіз фрактограм алюмінієвих сплавів, модифікованих сильноточковим електронним пучком

<sup>1</sup>Інститут електрофізики та радіаційних технологій ім. 8812, вул. Чернишевського, 28, м. Харків, 61002, Україна,  
[vvlytyvnenko@ukr.net](mailto:vvlytyvnenko@ukr.net)

<sup>2</sup>ННЦ Харківський фізико-технічний інститут, вул. Академічна, 1, м. Харків, 61108, Україна

Алюмінієві сплави Д16 і АМг6 опромінено сильноточковим релятивістським електронним пучком у вакуумі. Інтенсивне електронне опромінення матеріалів зумовило зміну фізичних властивостей сплавів. Досліджено фрактальний характер зображень поверхонь зламів. Зміна фрактальності є відмінним параметром опису модифікації матеріалів. Характерні пластичні та крихкі руйнування супроводжуються зміною розподілу фрактальної розмірності.

**Ключові слова:** алюмінієвий сплав, фрактал, електронний пучок, опромінення, модифікація.

Отримано 17 січня 2023; Прийнято 22 березня 2023.

### Вступ

Отримання захисних поверхонь є однією із ключових задач для забезпечення безпеки як людського здоров'я, так і технічних систем. Серед багатьох існуючих підходів до вирішення цієї проблеми для металів, можна вибрати обробку поверхні опроміненням. Найпоширенішими підходами є: (i) лазерна обробка, (ii) опромінення йонами, (iii) обробка електронними пучками. Актуальним напрямком досліджень є отримання зміцнених поверхонь металевих пластин шляхом їх опромінення сильноточковими релятивістськими електронними пучками (СРЕП). Релятивістська енергія електронів забезпечує більш глибокий вплив на матеріал (100 мкм при 0,3-0,5 МеВ для легких металів), а висока сила струму створює екстремальні об'ємно-термомеханічні умови [1,2]. Ця технологія може бути ефективним інструментом модифікації поверхні металів для надання потрібних властивостей: мікротвердості, стійкості до зношування, стійкості до корозії тощо. Крім того, вона може бути поєднана з додатковими технологіями, такими як електроерозійне переплавлення, щоб

покращити властивості поверхні [3].

У той же час відомо [2, 4], що СРЕП-обробка металів має неоднорідний вплив на метали через її радіаційні, температурні та ударно-хвильові ефекти. У цьому випадку, глибина модифікованого шару значно перевищує середню довжину пробігу електронів у матеріалі. Таким чином, мікроструктура разом з таким показником як мікротвердість, значно змінюються впродовж глибини впливу. Передбачається, що новоутворені зони неоднорідної мікроструктури на поверхні можуть знизити вплив зовнішніх чинників. Також виявлено, що попередня СРЕП-обробка алюмінієвих сплавів призводить до значного покращення суперпластичної деформації [5]. Розподіл щільності дислокацій в об'ємі опроміненого матеріалу та їхньої просторової орієнтації змінюються непередбачувано. Розглядаючи перелік ефектів, що виникають під час опромінення металевих пластин за допомогою СРЕП з точки зору можливості отримання ударостійких матеріалів, можна сказати, що вони представляють технологічні перспективи. Захисна властивість матеріалу залежить від його здатності перетворювати кінетичну енергію об'єкта удару на власну внутрішню енергію, а також на енергію

власних деформацій у всіх напрямках, за винятком напрямку, в якому розташований захищений об'єкт. Цього можна досягти, створивши анізотропію в мікроструктурі твердого матеріалу з використанням СРЕП.

Оскільки ми маємо справу з неоднорідним розподілом властивостей об'єкта, можна використовувати апарат фрактального аналізу як макроскопічний інструмент для оцінки впливу опромінення СРЕП, досліджуючи злами опромінених матеріалів та еталонного матеріалу. Фрактальний аналіз може надати кількісні дескриптори (характеристики для опису) досліджуваних об'єктів. Відносна зміна цих дескрипторів насправді є результатом зміни мікроструктур та відповідних механізмів руйнування. Одним з загальних дескрипторів фракталів є фрактальна розмірність  $D$ . Вона описує зміни складності поверхні, що вивчається. Чим складніша поверхня (наприклад, шорсткість, видимі об'єкти), тим складнішим є розподіл фрактальної розмірності [6]. Однак, слід мати на увазі, що зміни  $D$  насправді можуть не призводити або не корелювати зі змінами певних механічних властивостей, і навпаки. Це пояснюється тим, що методи, що використовуються для розрахунку  $D$ , можуть бути нечутливими до вказаних змін. Наприклад, твердість може змінюватися, тоді як фрактальна розмірність залишається майже незмінною.

Для дослідження вибрали 2 алюмінієві сплави: сплав АМг6 системи Al-Mg та Д16 системи Al-Cu-Mg. Ці сплави широко використовуються в авіакосмічній галузі та для виробництва спеціальних легких транспортних засобів. Нашою науковою групою вже проводилися дослідження цих сплавів, результати яких представлені в [7], тому вони підходять для цього окремого дослідження щодо вивчення їх розломів з використанням апарату фрактального аналізу.

## I. Матеріали і методи

Для поточного дослідження використано алюмінієві сплави Д16 (91,9% Al; 4,8% Cu; 1,5% Mg; 0,8% Mn; домішки Fe та Si до 0,5%, ваг.%) та АМг6 (92,197% Al, 0,1% Cu; 6% Mg; 0,6% Mn; 0,4% Fe; 0,4% Si; 0,2% Zn ; 0,1% Ti; 0,003% Be, ваг.%), як у попередньому дослідженні [7]. Зразки опромінених матеріалів підготовлено у вигляді, придатному для наступних механічних деформацій у різних режимах.

Опромінення проводилося на імпульсному електронному прискорювачі ТЕМР-А ННЦ ХФТІ [1] із струмом – 2 кА, енергією електронів 0,3 МеВ та тривалістю імпульсу близько 5 мкс. Опромінення здійснено у вакуумі.

Для підготовки зразків до фрактографічного аналізу, зразки злаmano при кімнатній температурі, а злами досліджено з використанням скануючого електронного мікроскопа (СЕМ) JEOL JSM-840.

Фрактальний характер зображень зламів у СЕМ вивчено за методологією, описаною в [8]. Зміна інтенсивності в зображеннях мікроструктур у відтінках сірого кольору, є складною

характеристикою, яка залежить від шорсткості зламу, структури зерен та параметрів сканування мікроскопу, таких як підсвічування (сигнал) та фокусування. Якщо припустити, що умови зображення мікроскопа є оптимальними, то фрактальний аналіз можна провести для СЕМ знімків, щоб описати мікроструктури об'єктів.

Аналіз фрактальної розмірності проведено за допомогою внутрішньо розробленого програмного пакету, на основі методу Кларка – методу поверхні трикутної призми (МППТ) та похідних методів [9, 10]. Узагальнено, Кларк розширив підхід Мандельброта на площинну сітку. МППТ дозволяє розраховувати фрактальну розмірність цифрової поверхні шляхом побудови віртуальних призм на поверхні з використанням значень пікселів у відтінках сірого. Площа поверхні  $A$  покривається трикутними призмами на квадратному вікні з кроком  $\delta$ . Потім для кількох значень  $\delta$  на log-log шкалі будується регресія  $A$ - $\delta$  методом найменших квадратів через отримані точки даних [11]:

$$A(\delta) = N(\delta)\delta^2 = K\delta^{2-D} \quad (1)$$

$$\text{Log}(A) = K + (2 - D)\text{Log}(\delta) \quad (2)$$

$$D = 2 - \beta \quad (3)$$

де  $N(\delta)$  – кількість зроблених кроків,  $K$  – константа,  $D$  – фрактальна розмірність, а  $\beta$  – нахил лінії регресії. Якщо нахил лінії  $\log(D)$ - $\log(\delta)$  дорівнює нулю, то  $D$  наближається до теоретичного значення 2. Інакше кажучи, зображення у відтінках сірого кольору розглядається як матриця з певним розміром пікселів  $x \times y$ , а інтенсивність зображення (1..256) розглядається як висота. Таким чином, можна покрити зображення віртуальними призмами і розрахувати карти фрактальних розмірностей, як описано вище.

Відповідний програмний пакет розроблено раніше на Pascal/Delphi [12]. Для розрахунків у теперішньому дослідженні вибрано МППТ метод на квадратних вікнах вибірки розміром 4x4 пікселів з кроком 1 піксель. Дані  $A$ - $\delta$  обчислено збільшуючи розмір кроку  $\delta$  від 1 до 4 пікселів. За точку початку для призми з 1 пікселем взято верхній лівий кут зображення. Вибір такої точки початку має малий ефект спотворення, оскільки розрахунок виконувався з кроком 1 пікселя в напрямках  $x$  та  $y$ . Наступним етапом було обчислення нахилу лінії регресії. Малий розмір вікна мінімізував розмиття та згладжування об'єктів. Відомо, що МППТ метод недооцінює чи спотворює фрактальну розмірність  $D$ , тому проведено відповідні тести для встановлення таких ефектів. Назагал, ймовірні переоцінки або недооцінки фрактальної розмірності менш важливі, оскільки фрактальний аналіз нами використовується для порівняння зразків, а у випадку нагальності корекції на недооцінку, рекомендується звернутися до дослідження в [13].

Щодо помилок обчислення фрактальної розмірності, їх можна оцінити безпосередньо з обчислень, але це робить обчислення більш складними, і важче осмислити фізичний зміст

помилки. Натомість, рекомендовано проводити реальні тести на зображеннях, коли фрактальний розмір наближається до певного теоретичного очікуваного значення. Автори обрали останній підхід.

Необхідні візуалізації та обробка даних виконано у Python 3, включно з бібліотекою plotly v5.11. Код програм написано в Jupyter notebooks, що сприяло розробці завдяки зручному інтерфейсу та покращеній співпраці між виконавцями.

## II. Обговорення

Перед аналізами реальних зразків, проведено тести фрактальних обчислень. Оскільки об'єктами даних для аналізу були зображення SEM, було необхідно встановити як алгоритм обчислює фрактальний розмір  $D$  для деяких типових випадків. Наприклад, на Рис. 1а показано тестовий зразок 1, який є вирізаним шматком SEM-знімка відносно рівної поверхні зламу, та зразок 2, який також є частиною SEM-знімка, але нечіткою через дефокусування. Зразок 1 фактично був взятий з Рис. 2б, а зразок 2 - з Рис. 2а. Далі, обчислено фрактальні карти після розрахунку фрактальних

розмірів для обраних тестових зображень. Оскільки вікно вибірки становило 4x4 пікселів, реальний ефект згладжування не був великим порівняно з випадками з великими вікнами вибірки, наприклад, 10x10. Однак, оскільки алгоритм ковзає по двох вимірах SEM-зображення при обробці градацій сірого, відбувається деяке розмиття. Ефект розмиття помітний на чітких межах. Наприклад, на зразку 1, де присутній білий фон через обрізку, межа розмивається на фрактальній карті. Тому важливо мати зображення з високою роздільною здатністю та мінімізувати розмір вікна вибірки, коли є потреба досліджувати малі об'єкти з більшою точністю.

Після розрахунку фрактальних карт, можна побудувати розподіл фрактальних розмірностей відносно кількості пікселів. Такі фрактальні розподіли представлені на Рис. 1б. Вони нормалізовані на максимальне значення частоти пікселів у кожному розподілі, адже це спрощує порівняння між зразками. Розмір кроку усереднення для спектрів фрактальної розмірності для всіх розподілів становить 0,01. Гостра вершина при  $D \sim 2$  для зразка 1 відповідає білому фону обрізаного зображення. Власне це підтверджує, що плоска двовимірна поверхня не повинна мати жодних особливостей та об'єктів. Коли інтенсивність пікселів

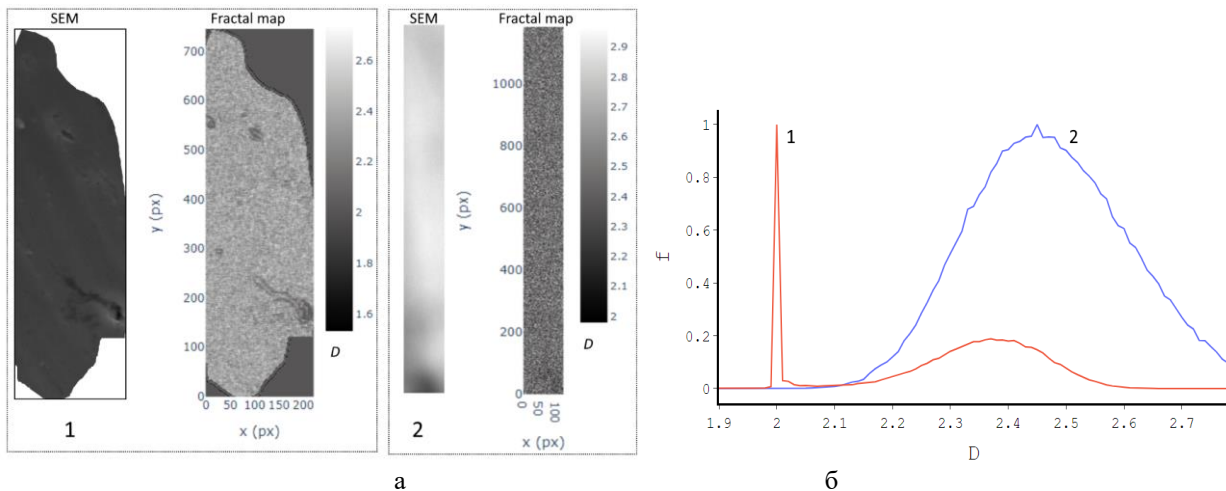


Рис. 1. Тести на частинах SEM знімків (а) і їх відповідні (б) розподіли нормалізованої частоти обчислених фрактальних розмірностей, де (1) – тестовий зразок 1, (2) – тестовий зразок 2.

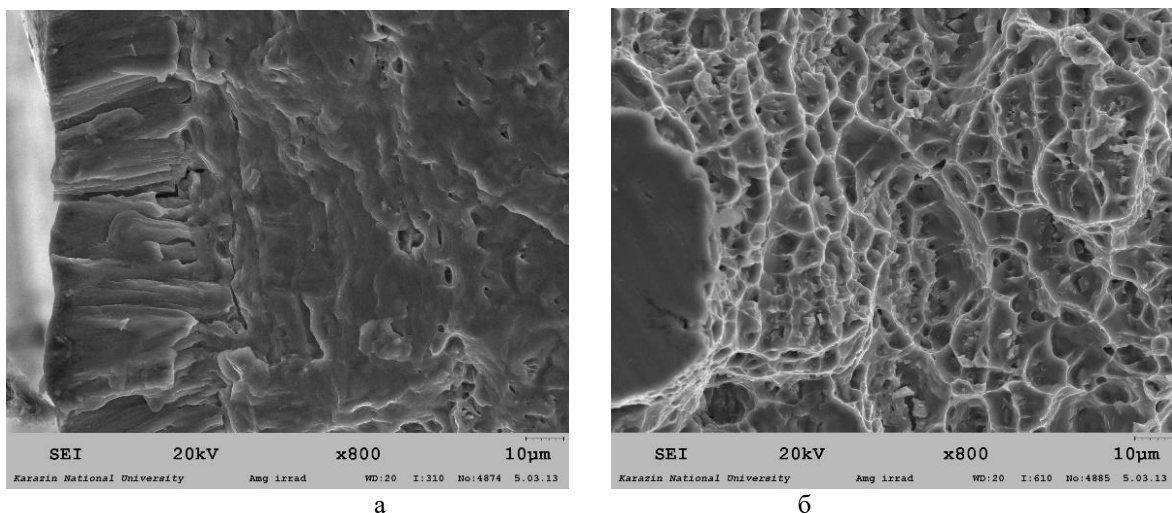


Рис. 2. Фрактограми зламів сплаву АМг6. (а) опромінений матеріал, приповерхнева область, (б) сталонний матеріал в центральній частині зразка.

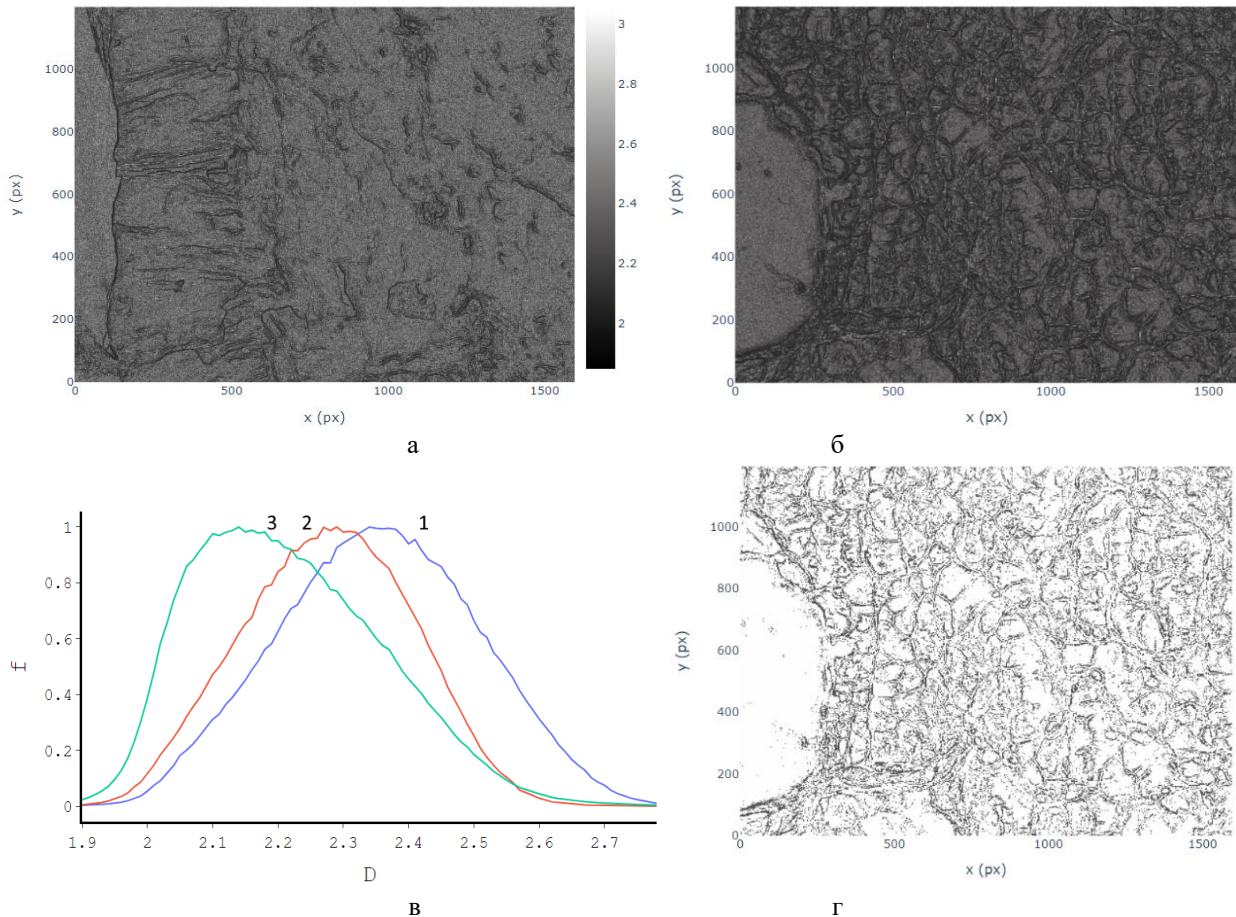
починає змінюватись, то  $D$  зростає. Плоска поверхня зламу зразка 1 має другу вершину при  $D \sim 2,37$ . Зразок 2 має широкую вершину при 2,46, що характеризує більш хаотичний об'єкт. Виявилось, що метод чутливий до невеликих відхилень інтенсивності або шумів, як очікувалось [10]. СЕМ знімки з більшим вкладом шуму, матимуть ширшу вершину при  $D \sim 2.5$ . Бачимо, що розраховане значення з вершиною  $D \sim 2$  наближається до теоретичного значення при  $D \sim 2$ . Похибку розрахунку можна оцінити як повну ширину на половині максимуму, яка становила близько  $\sim 0,01$  (проте для цього тесту розмір кроку усереднення для розподілу фрактальної розмірності становив 0,002). Відносна похибка всіх розрахунків фрактальних розмірностей у цьому дослідженні становить  $\sim 0,01$ .

Під час обчислення  $D$ , фактичні значення не обмежуються максимальним теоретичним значенням 3 та мінімальним значенням 2. Алгоритм Кларка може не враховувати належним чином фактичну поверхню з віртуальними призмами, що спричиняє помилки. Тому значення можуть бути трішки меншими, ніж 2, або більшими, ніж 3 для декількох точок на великому СЕМ знімку. З такими припущеннями, тепер можна перейти до аналізу реальних фрактограм.

На Рис. 2 показано фрактограму сплаву АМг6. Зліва на Рис. 2а, поверхня мішені переплавлена пучком, що характеризується зернами видовженими перпендикулярно до поверхні. Це типова

рекристалізована мікроструктура зони переплаву (ЗП) через направлену кристалізацію. Товщина рекристалізованої зони сягає  $\sim 100$  мкм в епіцентрі опромінення. Хоча пучок розплавляє до глибини приблизно 500-600 мкм, більша частина матеріалу втрачається через абляцію в навколишнє середовище. Витягнуті зерна мають товщину  $\sim 1-5$  мкм і простягаються через всю рекристалізовану зону. Справа на Рис. 2а, утворилась груба глобулярна мікроструктура. Це зона теплового впливу і ударно-хвильового впливу пучка (ЗТВ). Мікротвердість такої опроміненої області на 20% вища порівняно з неопроміненим металом, як зазначено в [7]. Крім ефектів рекристалізації, утворення хвиль стискування-розтягу в об'ємі мішені сприяє зміні мікроструктури, як це було обговорено в [14]. Механізм руйнування ЗП є крихким, з чіткими міжкристалітними тріщинами і між ЗП та ЗТВ. В останньому випадку з'являються тріщини, підтверджуючи погану адгезію між рекристалізованим шаром та ЗТВ, Рис. 2а.

На рис. 2б, показано фрагмент центральної частини пластини. На цю частину не вплинуло СРЕП опромінення і вона є еталонним матеріалом. Еталонний сплав АМг6 має фасеткову мікроструктуру розміром 2-8 мкм. Механізм руйнування має переважно пластичний характер з елементами крихкого руйнування. Є багато тонких незалежних ямок діаметром  $\sim 2$  мкм, рівномірно розподілених на



**Рис. 3.** Обчислені фрактальні розмірності СЕМ зніmkів для сплаву АМг6: (а) опромінений матеріал, (б) еталонний неопромінений матеріал. Палітра кольорів для фрактальної розмірності  $D$  включена в (а) для наглядності. (в) показує розподіл нормалізованої частоти в: 1) зоні переплаву, 2) зоні теплового впливу, 3) неопроміненого еталону. (г) зображено відфільтровану карту фрактальних розмірностей для (б), де  $D < 2.2$ .



поверхні зламу. На межах фасеток наявна тверда фаза у вигляді дрібних частинок розміром 0,5-3 мкм. Припускається, що це  $Al_2Mg_3$ ,  $(Fe, Mn)Al_6$ ,  $Mg_2Si$ , як знайдено в [15].

Загалом, СРЕП опромінення призвело до формування тонкого крихкого поверхневого шару рекристалізованого матеріалу. Механічні властивості в ЗП погіршилися в сенсі захисного шару. Відомо, що обробка матеріалів методом СРЕП призводить до утворення залишкових компресійних напружень, які насправді зумовлюють гіршу адгезію розплавленої зони матеріалу до основного матеріалу. Напруження досягають приблизно 80-150 МПа [16].

Карти фрактальної розмірності частин СЕМ знімків що на Рис. 2, наведені на Рис. 3а-б. Градація кольорів є однаковою для обох зображень, тому опущена на Рис. 3б. Як бачимо, фрактальний аналіз є потужним інструментом для виявлення крайових об'єктів. Він чітко виділяє границі зерен та тріщин, як темні риси на сірому фоні. Нормалізовані частотні розподіли показали різницю у фрактальній розмірності для ЗП, ЗТВ та еталонного матеріалу. Виявилось, що фасеткова мікроструктура еталонного матеріалу має більший внесок крайових об'єктів чи границь, що призводить до зміщення  $D$  в бік менших значень. Зона переплаву має найбільший внесок фонового шуму, оскільки вона має менше особливостей і об'єктів порівняно з іншими зонами, що відзначилось на її піку, ширині і "хвостах"

розподілу. ЗТВ з фасетково-глобулярною мікроструктурою має проміжний розподіл фрактальних розмірностей через свою природу формування. Щоб продемонструвати різницю між фоновим шумом та краєвими особливостями, на Рис. 3г показано відфільтровані дані зображення при  $D < 2,2$ . Знайдено відмінності між фонами ( $D > 2,2$ ) для всіх зон, але наразі неясно, яким є реальний вплив умов СЕМ сканування та фактичної мікроструктури, що вимагає подальших досліджень.

Дослідження руйнування алюмінієвого сплаву Д16 були розпочаті раніше нашою групою [7]. Як видно з Рис. 4а, руйнування опроміненої частини мішені супроводжувалося виділенням енергії внутрішнього напруження, що проявлялося в деформації на мезомасштабному рівні. Еталонний матеріал представлений на Рис. 4б, руйнування проходило в переважно крихкому режимі, з міжзеренним руйнуванням і дрібними ямками. Опромінений матеріал характеризується пластичним механізмом руйнування в зоні термічного впливу, що супроводжується великими глибокими ямками та розривними гребнями. З точки зору поглинання енергії зовнішнього удару, опромінений матеріал може бути кращим як захисний шар. Аналіз фрактальної розмірності (Рис. 5) виявив зсув розподілу до нижчих значень  $D$ , як з точки зору положення піку, так і "хвоста" з вищим  $D$ . Зниження у розподілі фрактальної розмірності в основному

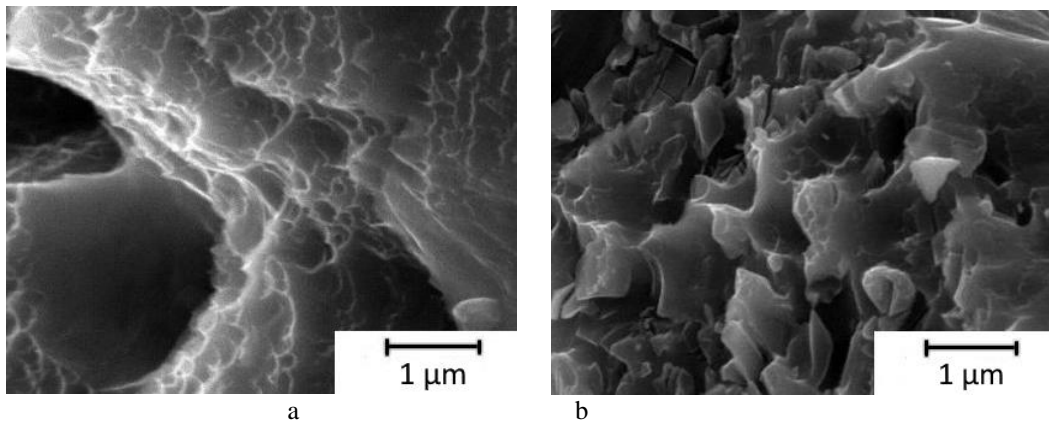


Рис. 4. Фрактограми сплаву Д16: а) опромінена область в зоні теплового впливу, б) неопромінений еталонний матеріал.

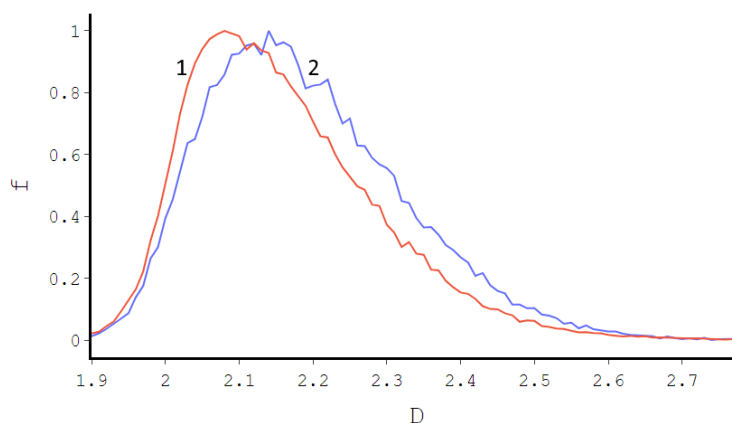


Рис. 5. Розподіл нормалізованих частот обчислених фрактальних розмірностей СЕМ знімків сплаву Д16: 1) опромінений матеріал в зоні теплового впливу, 2) неопромінений еталонний матеріал.

відбувається за рахунок зміни режиму руйнування і, таким чином, у присутності більшої кількості границь чи інших крайових об'єктів. На основі результатів для сплаву АМг6 і сплаву Д16. виявилось, що чим крихкіші алюмінієві сплави, тим вищий внесок шуму, а фрактограми із розподілом, що наближається до  $D \sim 2$ , відносяться до більш пластичної мікроструктури.

Пропонується розширити нелінійність поведінки механічних властивостей алюмінієвих сплавів враховуючи фрактальну розмірність мікроструктури, тобто їх зламів. У такому випадку, поведінка може відповідати модифікованому рівнянню Холла-Петча, як описано Tian та ін. в [17]:

$$\sigma = \frac{F}{A} \left( 1 + \frac{k}{r^{2\alpha-2}} \right) \quad (4)$$

де  $F$  є прикладеною силою до кристалічного об'єкта з перерізом площею  $A$ ,  $k$  - константа,  $r$  є розміром кристалітів чи зерен, і  $\alpha$  є фрактальною розмірністю. Рівняння перетворюється на класичне правило Холла-Петча при  $\alpha=5/4$ . Назагал, можна припустити, що фрактальна розмірність впливає на локальні механічні властивості, і було б корисно провести випробування на розтяг, або тести піко- чи нано-твердості у майбутньому для підтвердження цієї залежності. Також, більш ґрунтовне розуміння фрактальних дескрипторів зламів і мікроструктури, може покращити прогнозування руйнування матеріалів. Однак незрозуміло, як обчислені фрактальні карти можуть бути використані бо значення можуть містити великі внески шуму, хаотичні зміни умов сканування СЕМ. Ймовірним покращенням є виділення компонент з фрактальних розподілів як на Рис. 3: шум/фон як нормальний розподіл з піком  $D \sim 2.4-2.5$ , і внеском інших об'єктів з піками біля  $D \sim 2-2.3$ . Нашою групою заплановано проведення більше досліджень в цій області.

Потенційні області застосування фрактального аналізу зображень мікроструктури можна розширити на більш прості питання, оскільки це полегшує виявлення границь меж зерен та інших висококонтрастних характеристик об'єктів. Наприклад, автоматизований аналіз мікроструктури може бути реалізований у поєднанні з іншими методами. Такий підхід надасть детальну інформацію про механізми руйнування, порівняння мікроструктур, кількісний опис мікроструктур.

## Висновки

Модифікація поверхонь алюмінієвих сплавів шляхом обробки за допомогою сильнотривого релятивістського електронного пучка, змінила природу мікроструктури їх приповерхневого об'єму. СРЕП-обробка сплаву АМг6 спричинила окрихчення переплавленої зони. Зона теплового впливу у матеріалах також набула суттєвих змін в мікроструктурі. Ця зона у сплаві Д16 стала більш пластичною у порівнянні з еталонним матеріалом. Фрактальний аналіз показав чіткі відмінності сплавів до та після модифікації у термінах фрактальної розмірності СЕМ знімків поверхонь зламів. Більш пластичні зони зразків мали вагомий внесок фрактальної розмірності близько до 2, порівняно з більш крихкими мікроструктурами. Це пояснюється великою кількістю крайових об'єктів і границь у першому випадку.

### Подяка

*Дослідження, представлене в цій статті, виконано за фінансової підтримки Державної бюджетної програми України «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» (бюджетний код 6541230).*

**Донець С.Є.** – канд. техн. наук, старший науковий співробітник, Інститут електрофізики і радіаційних технологій Національної академії наук України;

**Литвиненко В.В.** – доктор техн. наук., директор, Інститут електрофізики і радіаційних технологій Національної академії наук України;

**Старцев О.А.** – канд. фіз.-мат. наук, молодший науковий співробітник, Інститут електрофізики і радіаційних технологій Національної академії наук України;

**Лонін Ю.Ф.** – доктор техн. наук., начальник відділу, ННЦ Харківських фізико-технічних інститут Національної академії наук України;

**Пonomарьов А.Г.** – канд. фіз.-мат. наук, начальник лабораторії, NSC ННЦ Харківських фізико-технічних інститут Національної академії наук України;

**Уваров В.Т.** – канд. фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник, ННЦ Харківських фізико-технічних інститут Національної академії наук України.

- [1] V.T. Uvarov et al., *Radiation acoustic control over the thermal parameter of construction materials irradiated by intense relativistic electron beam*. Physics of Particles and Nuclei Letters. 11(3) (2014); <https://doi.org/10.1134/S1547477114030157>.
- [2] V.V. Bryukhovetsky et al., *The structural phase state and strength properties of the surface layer of AA6111-T4 aluminum alloy irradiated by the high-current electron beam*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 519 (2022); <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2022.03.008>.
- [3] V. Tarelnyk et al., *New sulphiding method for steel and cast iron parts*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 233(1), 012049; <https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012049>.

- [4] V.V. Bryukhovetsky et al., *The features of the structural state and phase composition of the surface layer of aluminum alloy Al-Mg-Cu-Zn-Zr irradiated by the high current electron beam*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 499 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.02.011>.
- [5] V.V. Bryukhovetskii et al., *Effect of pulsed electron irradiation on the parameters of duraluminum superplasticity*, Fiz. Khim. Obrab. Mater., 4 (2002); [https://www.researchgate.net/publication/292062571\\_Effect\\_of\\_the\\_pulsed\\_electron\\_irradiation\\_on\\_superplasticity\\_properties\\_of\\_duraluminum](https://www.researchgate.net/publication/292062571_Effect_of_the_pulsed_electron_irradiation_on_superplasticity_properties_of_duraluminum).
- [6] M. Tarafder et al., *Fractal analysis of microstructural images for evaluation of HSLA steel*. Supplemental Proceeding, TMS, 2 (2010); <https://eprints.nmlindia.org/3309/>.
- [7] М.І. Базалєєв та ін., *Ударно-захисні поверхні алюмінієвих сплавів, модифікованих сильноточковим релятивістським електронним пучком*, Журнал фізики і інженерії поверхні, 1 (2017); <http://dspace.nbuu.gov.ua/handle/123456789/122608>.
- [8] В.Ф. Клепиков та ін., *Фрактальність поверхонь зламів алюмінію і титану опромінені інтенсивним електронним пучком*, Журнал Нано- та Електронної Фізики, 8(3) 03009 (2016); [https://doi.org/10.21272/jnep.8\(3\).03009](https://doi.org/10.21272/jnep.8(3).03009).
- [9] K.C. Clarke, *Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method*, Computers & Geosciences, 12(5) (1986); [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(86\)90047-6](https://doi.org/10.1016/0098-3004(86)90047-6).
- [10] W. Sun et al., *Three New Implementations of the Triangular Prism Method for Computing the Fractal Dimension of Remote Sensing Images*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 72(4) (2006); <https://doi.org/10.1080/01431160600676695>.
- [11] C. Nayak, *Comparing various fractal models for analyzing vegetation cover types at different resolutions with the change in altitude and season*, MSc Thesis, ITC, IIRS (2008); [https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers\\_2008/msc/gfm/nayak.pdf](https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_2008/msc/gfm/nayak.pdf).
- [12] A. Startsev, *Calculation of fractal maps for data sets*, IERT NAS of Ukraine (2014); <https://github.com/oleksandrstartsev/FractalsDimPRGs>.
- [13] M.K. Rathore et al., *Estimation of Fractal Dimension of Digital Images*, International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR), 2(9) (2014); [https://www.erpublishing.org/published\\_paper/IJETR022497.pdf](https://www.erpublishing.org/published_paper/IJETR022497.pdf).
- [14] В.В. Брюховецький та ін., *Особливості структуроутворення поверхні промислового алюмінієвого сплаву 6111 в зоні впливу імпульсного пучка електронів у режимі*, Питання Атомної Науки і Техніки, 72(2) (2011); [https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT\\_2011\\_2/article\\_2011\\_2\\_28.pdf](https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2011_2/article_2011_2_28.pdf).
- [15] G.I. Prokopenko et al., *Hardening of Surface Layer on Al–6Mg Aluminium Alloy, Using Complex Effects of Electric Spark and Ultrasonic Impact Treatments*, Metallofiz. Noveishie Tekhnol. 35(10) (2013).
- [16] В.Ф. Клепиков та ін., *Фізико-механічні властивості титанового сплаву ВТІ-0 після опромінення сильноточковим електронним пучком*, Питання Атомної Науки і Техніки, 96(2) (2015); [https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT\\_2015\\_2/article\\_2015\\_2\\_39.pdf](https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2015_2/article_2015_2_39.pdf).
- [17] Dan Tian et al. *Hall–Petch effect and inverse Hall–Petch effect: a fractal unification*, Fractals, 26(06) (2018); <https://doi.org/10.1142/S0218348X18500834>.

S.Ye. Donets<sup>1</sup>, V.V. Lytvynenko<sup>1</sup>, O.A. Startsev<sup>1</sup>, Yu.F. Lonin<sup>2</sup>, A.G. Ponomarev<sup>2</sup>,  
V.T. Uvarov<sup>2</sup>

## Fractal analysis of fractograms of aluminum alloys irradiated with high current electron beam

<sup>1</sup>*Institute of Electrophysics and Radiation Technologies, P.O. 8812, Chernyshevsky Str., 28, Kharkiv, 61002, Ukraine, [vvlytvynenko@ukr.net](mailto:vvlytvynenko@ukr.net)*

<sup>2</sup>*NSC Kharkiv Institute of Physics and Technology, Akademichna Str., 1, Kharkiv, 61108, Ukraine*

The aluminum alloys D16 and AMg6 were irradiated using the high-current relativistic electron beam in vacuum. Intense electron irradiation of the materials modified their physical properties. The fractal character of the fracture surfaces' images was studied. The change of the fractality is a distinguished descriptor of the materials modification. The characteristic ductile and brittle fractures are accompanied with the change of the fractal dimension.

**Keywords:** aluminum alloy, fractal, electron beam, irradiation, modification.