

ПОБУДОВА АНАЛІТИЧНОЇ МОДЕЛІ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОЇ МНОЖИНИ, ЯКА ВІДЗЕРКАЛЮЄ ВПЛИВ ФРАКТАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ СТРУКТУРНИХ СКЛАДОВИХ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ

В.В. Головка¹, О.В. Штофель², І.В. Красіков³

¹ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: vicholow@gmail.com

²НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Берестейський, 37.

³ІПМ ім. І.М. Францевича НАН України. 03142, м. Київ, вул. Кржижанівського 3.

Зростання використання високоміцних низьколегованих сталей у виробництві адитивних металоконструкцій супроводжується підвищенням вимог до достовірності результатів прогнозування в системі «склад–структура–властивості». Застосування методів фрактального аналізу дає змогу за допомогою числової параметризації встановити характеристики структури металу, металографічний аналіз яких дає лише якісну оцінку. У статті показано можливість фрактального аналізу для чисельної оцінки таких характеристик структури адитивних металів, як загальна довжина меж зерен, розподіл дислокацій на структурних границях зерен, щільність розподілу скупчень неметалевих включень на відстані менше $5r$ один від одного. Показано можливість чисельної параметризації структури та неметалевих включень у системі «структура–фрактал–властивості» для прогнозування механічних властивостей адитивного металу типу низьколегованих високоміцних сталей. Бібліогр. 7, табл. 7, рис. 9.

Ключові слова: адитивний метал, металографічний аналіз, фрактальний аналіз, металева конструкція, неметалічні включення, механічні властивості

Вступ. Постійно зростаючий рівень вимог до зварних конструкцій зумовлює актуальність проблеми оцінювання структури металу з метою підвищення надійності прогнозування властивостей зварних з'єднань. На механічні властивості металу найбільш суттєвий вплив мають складові його структури, що характеризуються високою чутливістю до навіть відносно малих варіацій термодинамічних параметрів їх формування. Стандарти з металографічних методів оцінювання складових мікроструктури металів стосуються до дуже обмеженого переліку об'єктів дослідження [1]. Зокрема стосовно одного з найпоширеніших при виготовленні зварних металоконструкцій матеріалу – низьколегованих сталей – стандартизовані методи використовуються для визначення:

- видимих розмірів феритного або аустенітного зерна (ДСТУ ISO 643:2009);
- середнього розміру зерна (ASTM E112-13);
- об'ємної частки ідентифікованого компонента або фази з розрізів мікроструктури за допомогою точкової сітки (ASTM E562-19);
- вмісту неметалевих включень чи другої фази в металевій основі (ASTM E1245).

Дослідження останніх років свідчать, що на механічні властивості сталей суттєвий вплив, окрім означених показників, справляють такі характеристики як розгалуженість міжзеренних та внутрішньозеренних границь зерен, скупчення

дислокацій, морфологія феритних зерен, щільність розподілу неметалевих включень в структурі металу [2]. Механічні властивості металу забезпечуються комплексом структурних параметрів, тому виокремлення з цього комплексу обмеженого переліку показників, які визначаються стандартами металографічних досліджень, недостатньо для прогнозування механічних властивостей металу з високим рівнем відповідності експериментальним даним [3]. При дослідженні адитивного металу це набуває особливої актуальності в зв'язку з формуванням їх структури в умовах високоградієнтних температурних та концентраційних полів. Проблема врахування широкого переліку структурних показників полягає в тому, що результати топологічних замірів характеристик мікроструктури мають різний розмір фізичних параметрів, що ускладнює їх використання в процесах моделювання. На вирішення цієї проблеми спрямовані методи фрактального аналізу, які дозволяють оперувати однорідними числовими показниками для оцінювання різних структурних об'єктів [4].

Використання методів фрактального аналізу для кількісного оцінювання широкого кола структурних показників спрямовано на співставлення числових розмірностей елементів структури з показниками механічних властивостей металу. При цьому слід відзначити, що ефективність фрактального методу залежить від його чутливості до

Головка В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-2117-0864>, Штофель О.О. – <https://orcid.org/0000-0003-0965-6340>,

Красіков І.В. – <https://orcid.org/0009-0009-4802-7951>

© В.В. Головка, О.О. Штофель, І.В. Красіков, 2024

Таблиця 1. Фізико-хімічні характеристики сполук, які використовували при експериментах

Сполука	T плавлення, °C	Тип кристалової решітки	Параметр решітки, нм	Невідповідність з розміром δFe , %	Міжфазна енергія, мДж/м ²
TiN	2930	ГЦК	a-4,260	16	393
TiC	3160	ГЦК	a-4,336	18	3360
SiC	2730	Гексагональна	a-3,073 c-10,053	21	5340
TiO ₂	1843	Тетрагональна	a-4,593 c-2,959	25	360
Al ₂ O ₃	2044	Ромбоєдрична	a-5,120 a-55,25 ⁰	39	670

зміни характеристик досліджуваного матеріалу. Проведені дослідження були спрямовані на встановлення наявності взаємно однозначної відповідності числових розмірностей структурних складових адитивного металу типу низьколегованих сталей з їх механічними властивостями.

Матеріали та методи досліджень. Дослідження виконували на зразках адитивного металу, які були отримані при дуговому зварюванні стикових з'єднань низьколегованої сталі категорії міцності K69. Параметри збирання стикового з'єднання показані на рис. 1. Зварювання виконували порошковим дротом Oerlikon Fluxocord 35.22 діаметром 4 мм під шаром агломерованого флюсу CEWELD ST65. Зварювання проводили на постійному струмі 550 (± 10) А зворотної полярності при напрузі на дузі 35 (± 1) В з погонною енергією 14,7 (± 1) кДж/см. З метою отримання металу швів близьких за хімічним складом, але з певною різницею за вмістом структурних складових, до рідкої ванни в процесі зварювання інокулювали дисперсні частинки тугоплавких сполук. В якості інокулянтів використовували частинки розміром 50...200 мкм оксидів (Al₂O₃, TiO₂) та карбідів (SiC, TiC) і нітриду (TiN). Фізико-хімічні характеристики інокулянтів наведені в табл. 1. Дисперсні частинки інокулювали до зварювальної ванни через осердя порошкового дроту, який вводили у вигляді «холодної» присадки до рідкого металу. Присадковий порошковий дріт діаметром 1,6 мм виготовляли зі сталеві стрічки марки Св-08Ю розміром 0,5'12 мм з коефіцієнтом заповнення 20 %. Шихта осердя складалася з 10 % тугоплавких частинок і 90 % порошку заліза марки ПЖМ. Отримані дані співставляли з результатами аналізу зразків металу шва без інокулювання тугоплавкими сполуками (шов Base).

З металу зварних швів вирізали зразки для проведення хімічного, металографічного аналізів,

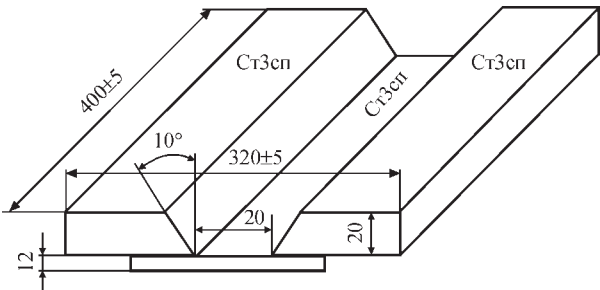


Рис. 1. Підготовка стикового з'єднання для отримання зразків металу швів відповідно з вимогами ISO 14171

визначення механічних властивостей за схемою, наведеною на рис. 2.

Металографічні дослідження проводили на поперечних шліфах, вирізаних із зварних з'єднань. Структуру металу швів досліджували на оптичному мікроскопі «Neophot 32». Виявлення мікроструктури у зразках проводили методом хімічного травлення у 4%-му спиртовому розчині азотної кислоти. Зразки для досліджень виготовляли за стандартними методиками із застосуванням алмазних паст різної дисперсності. Розмір структурних складових визначали відповідно до ГОСТ 5639.

Механічні властивості металу швів визначали відповідно до стандартів ДСТУ ISO 6892-1:2019 та ДСТУ EN 10045-1:2006.

Для вивчення питання взаємозв'язку структурних (фрактальних) і фізичних характеристик використовували програми визначення мультифрактальних характеристик зображень в результаті обчислення як мікрофотографій зі стандартним порогом, так і оброблених зображень, у яких виділено кордони.

Методами фрактального аналізу описували частку структурних складових і неметалевих включень в металі швів, описували за допомогою хаусдорфової розмірності D_0 , що несе узагальнену інформацію про розмірність простору, в якій сформований мультифрактал. Для оцінки щільності розподілу дислокацій на межах структурних зерен використовували спеціально розроблену програму, що характеризує неоднорідність розподілу елементів мультифракталу в просторі, а також програму для оцінки ймовірності знаходження включень, розташованих на відстані менше п'яти радіусів один від одного, що задається

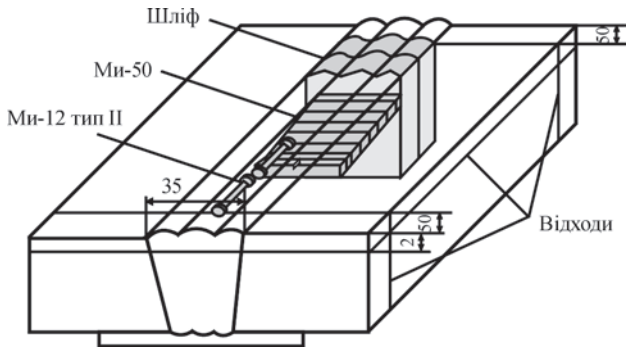


Рис. 2. Схема відбору зразків для проведення металографічного аналізу та визначення хімічного складу, механічних властивостей і структури металу швів

Таблиця 2. Хімічний склад металу швів

Шов	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti
Base	0,042	0,290	1,32	0,024	0,014	0,16	2,19	0,27	0,36	0,039	0,019
TiC	0,054	0,263	1,28	0,025	0,011	0,13	2,22	0,26	0,49	0,035	0,009
TiN	0,035	0,317	1,40	0,019	0,009	0,14	2,29	0,26	0,56	0,036	0,011
SiC	0,066	0,370	0,92	0,016	0,024	0,14	1,72	0,23	0,54	0,021	0,005
TiO ₂	0,035	0,405	1,24	0,016	0,021	0,11	1,97	0,27	0,68	0,031	0,017
Al ₂ O ₃	0,034	0,424	1,40	0,017	0,023	0,12	2,15	0,29	0,72	0,03	0,02

Таблиця 3. Механічні властивості металу швів

Шов	Rm	Re	A	Z	KCV, Дж/см ² при T, °C			
	МПа		%		20	0	–20	–40
Base	693	605	14	49	97	87	75	53
TiC	716	644	19	63	111	97	85	73
TiN	712	580	5,3	14,7	55	47	40	35
SiC	775	729	18	60	55	49	44	36
TiO ₂	709	639	19	57	85	72	60	50
Al ₂ O ₃	728	621	17	54	82	58	50	36

Таблиця 4. Вміст (%) структурних складових в металі швів

Шов	Бейніт верхній	Бейніт нижній	Ферит полігональний	Мартенсит	Частка неметалевих включень, %	Середній розмір феритного зерна, мкм
Base	52,0	31,8	9,2	10,8	0,62	51,24
TiC	22,2	60,8	6,0	9,5	0,62	45,24
TiN	21,0	57,8	9,8	9,9	0,77	54,31
SiC	25,0	55,5	9,2	9,3	0,64	44,18
TiO ₂	28,0	54,6	5,6	9,7	0,37	41,89
Al ₂ O ₃	41,2	28,7	12,8	17,3	0,47	41,18

Таблиця 5. Результати аналізу вмісту неметалевих включень в металі швів

Шов	Частка (%) включень в металі шва	Частка включень (%) в розмірному діапазоні			
		<0,31 мкм	0,37...0,61 мкм	0,67...0,97 мкм	1,03...1,57 мкм
Base	0,47	29,63	46,67	17,65	6,05
TiC	0,62	24,51	45,80	22,69	7,00
SiC	0,68	27,16	44,89	21,59	6,36
TiO ₂	0,81	30,89	40,96	20,37	7,78
Al ₂ O ₃	0,74	30,48	43,95	18,50	7,07

ймовірністю знаходження двох точок на певній відстані одна від одної.

Результати досліджень. В табл. 2 та 3 наведено результати визначення хімічного складу та механічних властивостей металу досліджених швів, а в табл. 4 та 5 вміст структурних складових та неметалевих включень в зразках зварних швів, відповідно.

Для проведення фрактального аналізу були відібрані по п'ять оптичних зображень вторинної структури при збільшенні $\times 1000$ для кожного

зразка металу шва (рис. 3, 4). Після комп'ютерної обробки зображень за програмою ImageJ було отримано бінаризовані зображення відповідних структур (рис. 5), для яких визначали фрактальний параметр D_0 . Результати фрактальної параметризації наведено в табл. 6.

У сталях і сплавах визначальний вплив на комплекс механічних властивостей має будова границь структурних зерен. При достатньо швидкій кристалізації металу зварювальної ван-

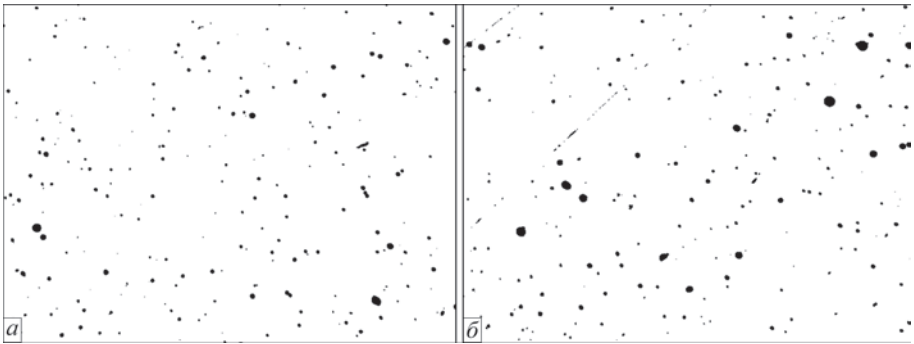


Рис. 3. Шліфи зразків металу шва: а – зразок Base; б – зразок TiC

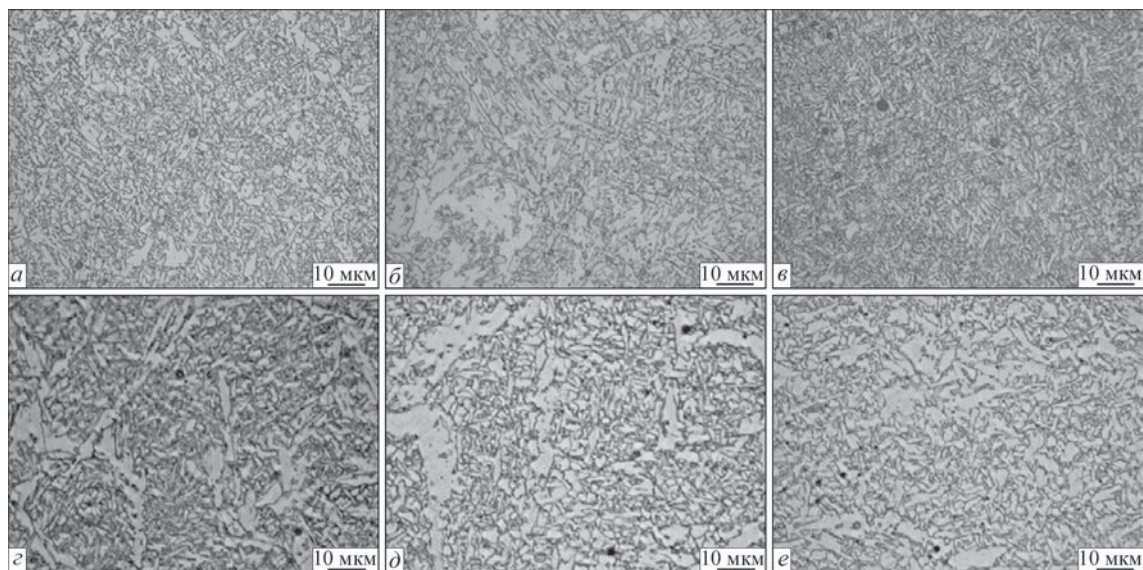


Рис. 4. Мікроструктура металу швів, модифікованих сполуками: *a* – Base; *б* – SiC; *в* – TiN; *г* – TiC; *д* – TiO₂; *е* – Al₂O₃

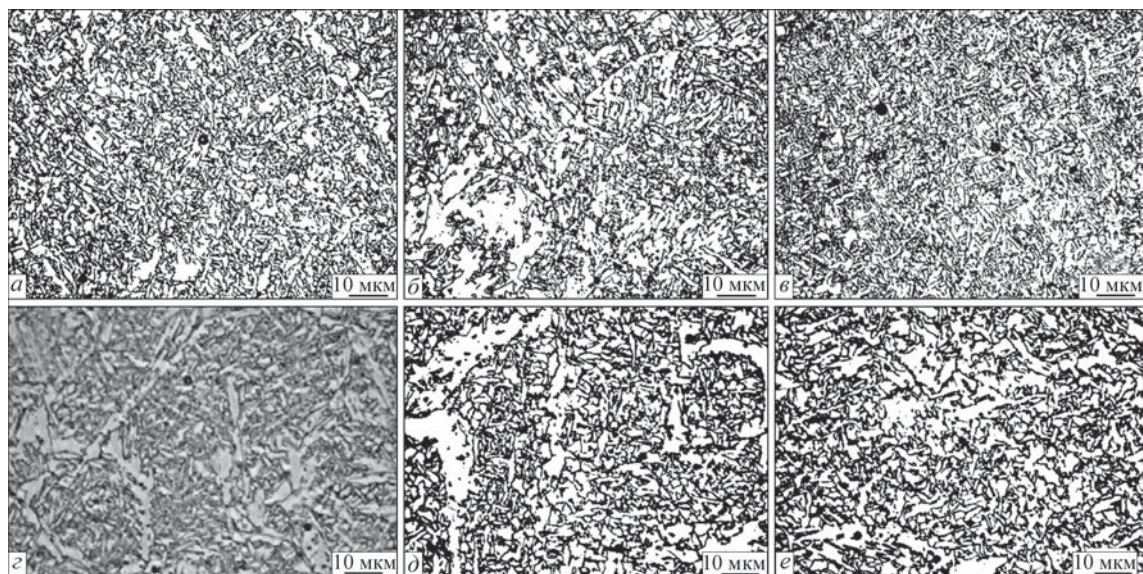


Рис. 5. Бінарізоване зображення структури металу швів, модифікованих сполуками: *a* – Base; *б* – SiC; *в* – TiN; *г* – TiC; *д* – TiO₂; *е* – Al₂O₃

ни, в умовах, далеких від рівноважних, в метали зварних швів зазвичай формується полікристалічна структура, зерна якої в залежності від умови зростання, зіткнення та рекристалізації мають довільну форму. Кристалічна решітка зерен по границях знаходиться під впливом силових полів решіток обох дотичних кристалітів, насичена домішковими атомами, дислокаціями, вакансіями, має підвищену енергію границь зерен. Ці обставини сприяють тому, що саме границі зерен є місцями найбільш високої вірогідності зародження та розвитку тріщин. Фрактальний аналіз має розширити базу наших знань щодо цих процесів з метою підвищення відповідності результатів їх комп'ютерного моделювання ре-

Таблиця 6. Фрактальні параметри, отримані в результаті аналізу оптичних зображень структури металу швів

Параметри шва	TiN	SiC	Base	TiC	TiO ₂	Al ₂ O ₃
Параметр вмісту включень D_v	0,9102	0,9024	0,8826	0,8349	0,7888	0,7829
Параметр розгалуженості зерен бейніту $D_{рзб}$	0,5158	0,5178	0,5244	0,5329	0,5510	0,5478
Параметр розгалуженості границь зерен $D_{ргз}$	1,9387	1,8767	1,9068	1,9317	1,8150	1,8225
Параметр розгалуженості дислокацій $D_{дис}$	0,4167	0,4807	0,4058	0,4157	0,3850	0,3965
Скупчення включень <0,5 мкм, $D_{0,3}$	0,659	0,693	0,972	0,702	0,645	0,587
Скупчення включень 0,5...0,8 мкм, $D_{0,5}$	0,738	0,916	1,056	0,782	0,752	0,658
Скупчення включень <0,8 мкм, $D_{0,8}$	1,009	1,102	1,252	1,254	1,119	1,067

альним механічним властивостям металу зварних з’єднань.

Для отримання фрактальної розмірності застосовували метод Мінковського [5]. З цією метою обирали декілька зображень для кожного зразка. На першому етапі за допомогою програми ImageJ вимірювали розміри всіх зерен структури та неметалевих включень, досліджували розподіл границь зерен та дислокацій в структурі металу, за допомогою програми Fractal [6] розраховували фрактальну розмірність досліджених об’єктів.

Для проведення фрактального аналізу були відібрані по п’ять оптичних зображень вторинної структури при збільшенні $\times 1000$ для кожного металу шва. Після обробки за програмою ImageJ отримали бінарні зображення відповідних структур, для яких визначали фрактальний параметр. Результати фрактальної параметризації наведено в табл. 6.

Для обчислення фрактальної розмірності було використано клітинний метод. Згідно цього методу підготовлене зображення фракталу (рис. 1) покривають сітками з квадратними клітками («box counting method») із зменшенням кроку сітки d до $1\text{px} = 0,0377\text{ мкм}$ і підраховують кількість кліток $N(d)$, у які потрапила інформаційна границя (границя зерна) досліджуваного фрактального об’єкту – структури. Фрактальну розмірність зображення D визначають внаслідок апроксимації отриманого набору точок за допомогою методу найменших квадратів за виразом (1):

$$D = \lim_{d \rightarrow 0} \frac{\ln N(d)}{\ln \frac{1}{d}}.$$

(1)

При дослідженні зазначеним методом були отримані дані з параметру розгалуженості неметалевих включень і щільність їх розподілу на відстані менше $0,5r$ одне від одного, при цьому слід зауважити, що складова програми не враховує розмір включень, а показує лише їх скупченість на відстані від 0 до 4 мкм до кожного наступного.

Фрактальні об’єкти мають як мінімум дві важливі якості: масштабну інваріантність і самоподібність, а також демонструють однакові рівні неправильності незалежно від збільшення об’єкта. З метою перевірки відповідності отриманих результатів умовам фрактального аналізу було проведено співставлення отриманих фрактальних параметрів $D_{\text{рзб}}$ розгалуження границь зерен бейніту у структурі металу швів в залежності від використаних збільшень ($\times 320$ та $\times 1000$), результати якого наведено в табл. 7.

Наведені в табл. 7 дані свідчать, що результати визначення фрактальних параметрів розгалуження границь зерен, які були отримані при трикратній різниці показника збільшення зображень, відрізняються не більше ніж $\sim 1\%$, що підтверджує

Таблиця 7. Фрактальні параметри розгалуженості зерен бейніту, отримані в результаті аналізу оптичних зображень структури металу швів

Шов	Фрактальний параметр $D_{\text{рзб}}$		
	Збільшення		Відхилення $D_{\times 1000}/D_{\times 320} \%$
	$\times 1000$	$\times 320$	
TiN	0,5158	0,5159	1,00
SiC	0,5177	0,5151	1,01
Base	0,5244	0,5194	1,01
TiC	0,5329	0,5258	1,01
TiO ₂	0,5479	0,5737	0,95
Al ₂ O ₃	0,5510	0,5244	1,05

можливість використання фрактальної параметризації для оцінювання структури металу швів.

Фрактальна параметризація характеристик неметалевих включень. Відомо, що на формування вторинної мікроструктури металу зварних швів низьколегованих сталей найбільш помітний вплив мають неметалеві включення розміром від 0,3 до 0,8 мкм. Методи фрактального аналізу дозволяють виділити вплив на механічні властивості металу швів певної групи включень. Такий підхід дозволив розглянути ефективність вмісту включень розміром 0,3...0,8 мкм при визначенні ударної в’язкості металу швів. На рис. 6 показано вплив фрактального розміру включень розміром 0,3...0,8 мкм на показник ударної в’язкості металу швів.

Як видно з наведених даних залежність між фрактальною розмірністю включень в розмірному діапазоні 0,3...0,8 мкм і рівнем ударної в’язкості металу швів має екстремальний характер, що свідчить про необхідність врахування додаткових характеристик неметалевих включень.

Однією з важливих характеристик включень є їх розподіл в структурі металу. Включення, які розташовані більш-менш рівномірно в структурі швів, не мають великого впливу на механічні властивості металу. В металі швів можуть бути включення, які розташовані на відстані одне від одного більше п’ятикратного радіусу включень ($L \geq 5r$),

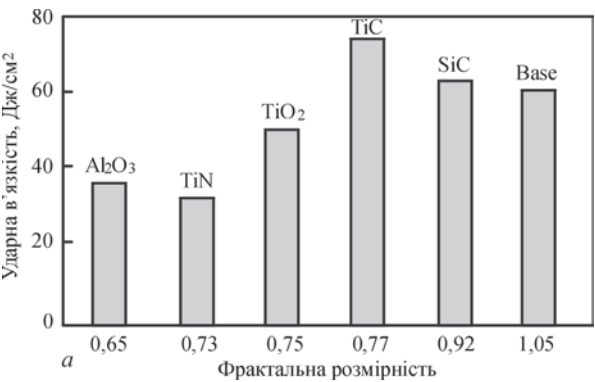


Рис.6. Залежність між фрактальною розмірністю включень розміром 0,3...0,8 мкм (D_v) та ударною в’язкістю металу швів при температурі випробування $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

або у вигляді скупчень ($L \leq 5r$), чи розташовані у вигляді ланцюжків на границях зерен. В останніх двох випадках такі скупчення можуть бути осередками зародження крихкого руйнування металу. На жаль сучасні методи металографічних досліджень не враховують щільність розподілу включень в металевій матриці.

Для оцінювання впливу неметалевих включень розроблено методику використання фрактальних показників для опису вмісту неметалевих включень в металі зварних швів. Програма [7] застосовує алгоритм рекурсивного обходу пікселів області включення на зображенні. Статистичні та стереометричні характеристики включень розраховуються виходячи з припущення круглої форми включень. Таким чином, ми оцінюємо радіус включення як $\pi \sqrt{S/\pi}$, де S – площа включення в пікселях. Після розрахунку розмірів включень програма будує гістограми розподілу включень за площею та розміром. Остання використовується як основа для розрахунку значення χ^2 критерію Пірсона, яке використовується для перевірки належності отриманої вибірки до одного з попередньо визначених типів розподілу.

Програма також надає можливість фільтрувати шуми на зображенні (наприклад, окремі пікселі, які вносять значне зміщення в гістограми під час вивчення розподілів за розмірами включень та відстанями між ними), а також дозволяє користувачам створювати діаграми з різною кількістю стовпців.

Фрактальний параметр, який враховує вплив щільності розподілу неметалевих включень на рівень ударної в'язкості можливо представити у вигляді виразу

$$D_{\text{нвц}} = 1,5(D_{0,8} - D_v) + D_{0,8}^{(1-0,75D_{\text{дис}})}, \quad (2)$$

де D_v та $D_{0,8}$ – фрактальний параметр загального вмісту неметалевих включень в металі шва та скупчень включень на відстані менше $0,5r$ одне від одного; $D_{\text{дис}}$ – фрактальний параметр щільності дислокацій на границях зерен.

У виразі (2) перша складова виокремлює вплив скупчення включень розміром до $0,8$ мкм на відстані менше $5r$ одне від одного із загального впли-

ву неметалевих включень. Друга складова описує вплив щільності розподілу дислокацій на границях структурних зерен ($1 - kD_{\text{дис}}$), де k – коефіцієнт пропорційності (0,75).

Результати визначення фрактального параметру щільності розподілу неметалевих включень на відстані менше $5r$ одне від одного, які наведено на рис. 7, б, свідчать, що такий показник більш коректно описує вплив включень на ударну в'язкість металу швів (рис. 7, а) порівняно з результатами, наведеними на рис. 6.

Слід зауважити, що програма, яка була використана при дослідженнях, дозволяє обраховувати фрактальний параметр розгалуженості дислокацій на границях зерен без врахування їх товщини і це дещо знижує відповідність між розрахунковими даними та результатами експериментів.

Фрактальна пераметризація зернової структури. Показники міцності металу визначаються розміром зерен (d), відповідно до залежності Холла–Петча, з одного боку та щільності дислокаційної структури на границях зерен, з іншого, а також впливом дисперсійного зміцнення, яке залежить від щільності розподілу в структурі металу скупчень неметалевих включень, які знаходяться на відстані менше $5r$ одне від одного.

Методи фрактального аналізу дають можливість врахувати параметри зерен структури на показники міцності металу, а також вплив дислокаційної структури на показники міцності металу за допомогою показника $D_{\text{дис}}$ та скупчень неметалевих включень через показник $D_{0,8}$.

Мультифрактальний показник $D_{\text{мф}}$ дозволяє описати сумарний вклад цих трьох складових:

$$D_{\text{мф}} = D_{\text{рзб}} + D_{\text{дис}} + D_{0,8}. \quad (3)$$

Результати визначення сумарного впливу показників структури зерен ($D_{\text{рзб}}$), дислокаційної структури ($D_{\text{дис}}$) та дисперсійного зміцнення ($D_{0,8}$) на показник межі плинності металу зварних швів ($\sigma_{0,2}$) представлено на рис. 8.

При цьому слід зауважити, що цей показник дозволяє враховувати як загально відомі характеристики – розгалуження бейнітних зерен структу-

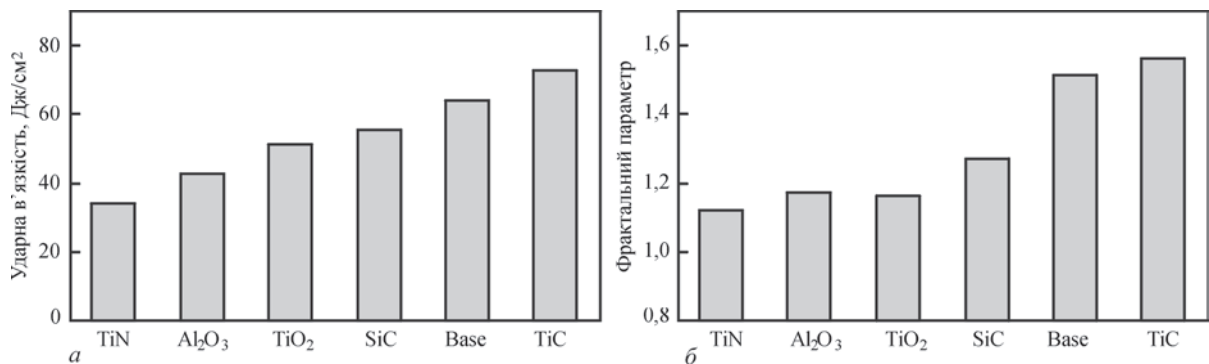
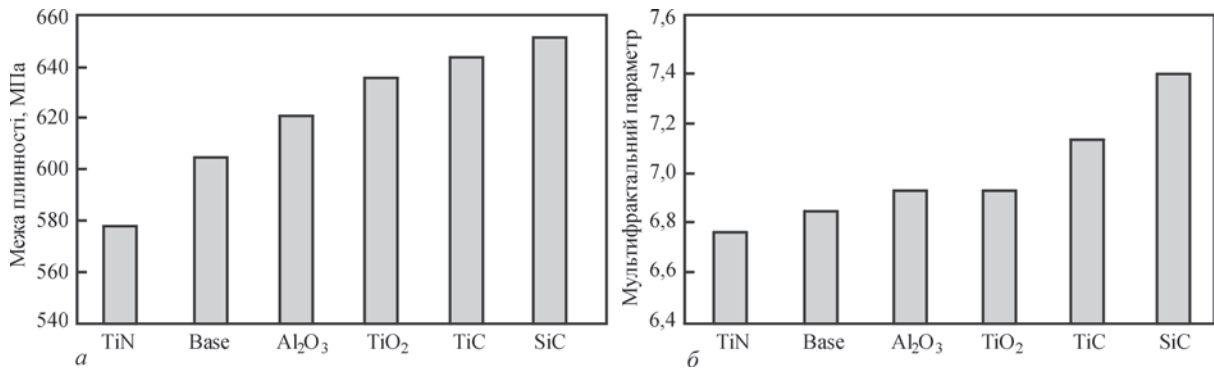
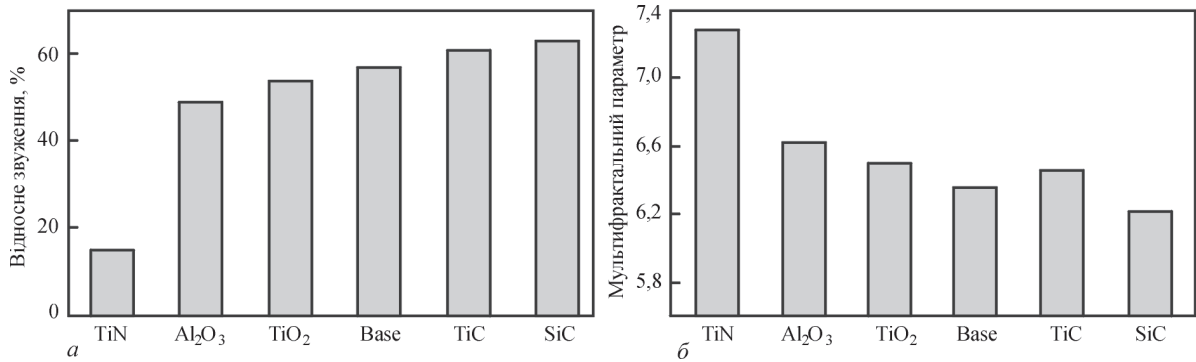


Рис. 7. Результати визначення показників ударної в'язкості при температурі випробування -20°C (а) та фрактального параметру неметалевих включень в металі швів $D_{\text{нвц}}$ (б)

Рис. 8. Результати визначення меж плинності металу швів (а) і мультифрактального показника D_{mf} (б)Рис. 9. Результати визначення відносного видовження зразків металу зварних швів (а) і мультифрактального показника D_{pl} (б)

ри ($D_{pзб}$) та розгалуження дислокацій на границях зерен ($D_{дис}$), так і показники розгалуження включень розміром більше 0,8 мкм ($D_{0,8}$), які не мають числового вираження при використанні методів оптичної металографії.

Слід зауважити, що програма, яка була використана при дослідженнях, дозволяє обрахувати фрактальний параметр розгалуженості границь зерен, а також фрактальний параметр розподілу дислокацій на границях зерен без врахування їх товщини і це дещо знижує відповідність між розрахунковими даними та результатами експериментів.

Пластичність металу зазвичай описують за допомогою показників відносного звуження і подовження зразків матеріалу до руйнування при статичному навантаженні. Процес руйнування починається із зародження мікротріщин і продовжується по мірі їх розвитку. Накопичення дислокацій при формуванні зернограничної структури та неметалевих включень на границях зерен металевої матриці сприяють підвищенню імовірності зародження тріщин. Наявність на межах зерен дисперсних включень розміром 0,5...0,8 мкм значно підвищує ризик утворення мікротріщин. За результатами фрактального аналізу структури зварних швів схильність до руйнування зразків металу при статичному навантаженні (показник є величиною, оберненою до пластичності металу) можна описати мультифрактальним показником $D_{пл}$:

$$D_{пл} = \ln D_{pзб} - D_{в} - D_{0,8} - 1,5 D_{дис}. \quad (4)$$

При цьому слід зазначити, що цей показник дозволяє врахувати такі загальновідомі характе-

ристики, як загальна довжина меж зерен структури ($D_{pзб}$) і розгалуженість неметалічних включень у металі ($D_{в}$), а також показники розгалуженості включень розміром понад 0,8 мкм, які знаходяться на відстані менше $5r$ одне від одного ($D_{0,8}$) та щільність дислокацій на межах зерен ($D_{дис}$), які не мають числового вираження при використанні методів оптичної металографії. З гістограм, наведених на рис. 9, видно, що характер зміни схильності до руйнування (обернена залежність відносно пластичності) металу шва можна описати за результатами фрактального аналізу.

Таким чином, наведений приклад системного аналізу свідчить про можливість розширення бази знань щодо особливостей впливу структурних складових та неметалевих включень в структурі металу на такі механічні властивості зварних швів, як показники міцності, пластичності та в'язкості завдяки використанню методів фрактального аналізу при виготовленні металоконструкцій з низьколегованих високоміцних сталей.

Встановлення сталих достовірних залежностей в системі «склад–структура–властивості» стосовно прогнозування параметрів технології зварювання, добору зварювальних матеріалів потребує використання розширеної бази знань з особливостей формування структури та неметалевих включень в металі швів, та їх впливу на механічні властивості зварних з'єднань. Збільшення обсягів використання методів фрактальної параметризації для аналізу характеристик структури зварних швів в системі «структура–фрактал–властивості» спри-

ятиме розвитку досліджень в галузі металознавства зварних металоконструкцій.

Висновки

Проведено дослідження методами фрактального аналізу впливу структурних зерен та неметалевих включень на показники границь механічних властивостей адитивного металу типу низьколегованих сталей. Показано, що параметри структури адитивного металу можуть розглядатися як фрактальні об'єкти, тому що мають як мінімум дві важливі якості: масштабну інваріантність і самоподібність, а також демонструють однакові рівні неправильності незалежно від збільшення об'єкта. В результаті проведених досліджень було встановлено:

1. Залучення методів фрактальної параметризації для аналізу оптичних зображень структури дозволяє суттєво розширити обсяг показників структури металу та неметалевих включень, залучених для опису залежності «склад–структура–властивості».

2. Методи фрактального аналізу дають можливість отримати числову параметризацію таких параметрів структурних границь зерен, як ($D_{гз}$) та щільності дислокаційної структури на границях зерен ($D_{дис}$).

3. Фрактальний аналіз оптичних зображень розподілу неметалевих включень в металевій матриці дозволяє отримати числові параметри вмісту включень (D_v) та щільності розподілу скупчення включень на відстані менше $5r$ одне від одного ($D_{0,8}$).

4. Залучення фрактального аналізу до цифрової параметризації показників структури та неметалевих включень в адитивному металі дозволяє значно розширити інформаційну базу, яка використовується при моделюванні в системі «склад–структура–властивості», стосовно до зварювання низьколегованих сталей.

Список літератури

1. Brown, C.U., Donmez, A. (2016) *Microstructure Analysis for Additive Manufacturing: A Review of Existing Standards*. <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.AMS.100-3>.
2. Bhadeshia H., Honeycombe R. (2017) *Seels. Microstructure and Properties*. Fourth edition. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved. ISBN: 978-0-08-100270-4
3. Большаков В.И., Дубров Ю.И., Касьян О.С. (2010) Микроструктура стали как определяющий параметр при прогнозе ее механических характеристик. *Допов. Нац. акад. наук Укр.*, **6**, 89–96.
4. Большаков В.И., Волчук В.Н., Дубров Ю.И. (2017) Топологические и фрактальные инварианты структуры для оценки качества металла. *Допов. Нац. акад. наук Укр.*, **4**, 42–48.
5. Sinha S., Kim D-I., Fleury E., Suwas S. (2015) Effect of grain boundary engineering on the microstructure and mechanical properties of copper containing austenitic steel Mater. Sci. Eng. A 626, 175–185.
6. Zhang, I., Lu, C., Tieu, K. (2016) A review on atomistic simulation of grain boundary behaviors in face-centered cubic metals. *Computer Mater. Sci.*, **118**, 180–191.
7. Красиков І.В. та ін. (2022) *Комп'ютерна програма «Fractulator 2»*. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 115438. Україна, 25.10.2022.

References

1. Brown, C.U., Donmez, A. (2016) *Microstructure Analysis for Additive Manufacturing: A Review of Existing Standards*. <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.AMS.100-3>.
2. Bhadeshia, H., Honeycombe, R. (2017) *Seels. Microstructure and Properties*. Fourth edition. Publ. by Elsevier Ltd. All rights reserved. ISBN: 978-0-08-100270-4.
3. Bolshakov, V.I., Dubrov, Yu.I., Kasyan, O.S. (2010) Microstructure of steel as the determinant parameter in prediction of its mechanical characteristics. *Dopov. NANU*, **6**, 89–96 [in Russian].
4. Bolshakov, V.I., Volchuk, V.N., Dubrov, Yu.I. (2017) Topological and fractal invariants of structure for evaluation of metal quality. *Dopov. NANU*, **4**, 42–48 [in Russian].
5. Sinha, S., Kim, D-I., Fleury, E., Suwas, S. (2015) Effect of grain boundary engineering on the microstructure and mechanical properties of copper containing austenitic steel Mater. Sci. Eng. A., **626**, 175–185.
6. Zhang, I., Lu, C., Tieu, K. (2016) A review on atomistic simulation of grain boundary behaviors in face-centered cubic metals. *Computer Mater. Sci.*, **118**, 180–191.
7. Krasikov, I.V. et al. (2022) *Computer program Faculator 2*. Certificate on registration of registration of copyright for the work, 115438, Ukraine, 25.10.2022 [in Ukrainian].

CONSTRUCTION OF AN ANALYTICAL MODEL OF MULTIFRACTAL SET THAT REFLECTS THE INFLUENCE OF STRUCTURAL COMPONENT FRACTAL PARAMETERS ON ADDITIVE METAL MECHANICAL PROPERTIES

V.V. Holovko¹, O.V. Shtofel², I.V. Krasikov³

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: vicholow@gmail.com

²National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. Beresteyskiy Ave., 37, 03056, Kyiv, Ukraine.

³Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NASU. 3 Krzhyzhanovskoho Str., 03142, Kyiv, Ukraine.

Growing use of high-strength low-alloy steels in additive metal structure manufacture is accompanied by an increase in the requirements to the reliability of prediction results in the “composition-structure-properties” system. Application of fractal analysis methods allows establishing the metal structure characteristics by numerical parametrization, the metallographic analysis of which gives only a qualitative assessment. The paper shows the possibilities of fractal analysis for numerical evaluation of such characteristics of additive metal structure as the total length of grain boundaries, distribution of dislocations at the grain structural boundaries, distribution density of nonmetallic inclusion accumulations at a distance less than $5r$ from one another. Shown is the possibility of numerical parametrization of the structure and nonmetallic inclusions in the “structure-fractal-properties” system for predicting the mechanical properties of additive metal of high-strength low-alloy steel type. 7 Ref., 7 Tabl., 9 Fig.

Keywords: additive metal; metallographic analysis; fractal analysis; metal structure; nonmetallic inclusions; mechanical properties.

Отримано 20.10.2023

Отримано у переглянутому вигляді 01.12.2023

Прийнято 18.12.2023