

ФРАКТАЛЬНА ПАРАМЕТРИЗАЦІЯ РОЗГАЛУЖЕНОСТІ БЕЙНІТНОЇ СТРУКТУРИ МЕТАЛУ ШВІВ ВИСОКОМІЦНИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

В.В. Головка, О.О. Штофель, В.А. Костін

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Наведено результати дослідження з визначення можливості оцінювання параметрів бейнітної структури металу зварних швів високоміцних низьколегованих сталей методом фрактального аналізу. Показана можливість оцінити розгалуженість бейнітної структури через фрактальний параметр $D = \ln(d)/\ln N(d)$, де d – розмір квадратної комірки, а $N(d)$ – кількість кліток, які покривають досліджувану фрактальну фігуру. Для досліджених зразків встановлена відповідність між фрактальним параметром розгалуженості бейнітної структури і показником в'язкості металу швів. Бібліогр. 5, табл. 4, рис. 2.

Ключові слова: зварювання, низьколегована сталь, мікроструктура, розгалуженість бейнітної структури, фрактальний аналіз

Вступ. В зв'язку з постійним зростанням обсягів використання високоміцних низьколегованих (ВМНЛ) сталей при виготовленні зварних металоконструкцій проблема підвищення рівня механічних властивостей зварних з'єднань має високу актуальність. Як відомо, механічні властивості зварних швів визначаються їх структурними складовими, а для ВМНЛ сталей ключовою в цьому плані є бейнітна структура. Питанням утворення бейнітної структури, її впливу на механічні властивості металу зварних швів ВМНЛ сталей приділяється велика увага в наукових дослідженнях металознавців, але база наших знань в цій галузі потребує постійного розширення і поглиблення. Саме на це направлені результати виконаної нами роботи.

Структура металу зварних швів низьколегованих сталей майже на 100 % складається з феритної фази. Відповідно до температурного діапазону утворення ця фаза може містити ферит Відманштента, полігональний ферит, верхній бейніт, нижній бейніт, внутризеренний бейніт та ряд інших утворень. При металографічних дослідженнях, зазвичай, мікроструктуру описують через частку вмісту цих складових в загальній структурі, а також через встановлення розмірів феритних зерен (як правило, зерен верхнього та нижнього бейніту). При цьому залишається поза увагою ще одна важлива характеристика структури. В процесі охолодження твердого розчину $g\text{Fe}$ бейніт формується у вигляді пластин та рейок, які зростають в напрямку максимального градієнту температур. На шліфах металу швів, в площині, перпендикулярній напрямку руху джерела нагріву, бейнітна структура виявляється у вигляді голчатих утворень. В численних дослідженнях було показано,

що показники морфології бейнітних голок (відношення довжини до ширини, кристалічна орієнтація, кут розорієнтування) мають помітний вплив на механічні властивості металу. Структури металу, які містять однакову об'ємну частку голчатого фериту але відрізняються за показником відношення довжини голок до їх ширини (коефіцієнт форми) будуть мати різні механічні властивості. Метал зі структурою дрібноголчатого бейніту буде відрізнятися від металу зі структурою грубоголчатого бейніту за показником щільності розгалуження бейнітної структури. Введення такого показника як щільність розгалуження бейнітної структури до аналізу складу мікроструктури металу дозволить підвищити валідність прогнозування механічних властивостей зварних швів.

Матеріали та методики для проведення досліджень. Дослідження проводили на зразках металу швів, які були виконані за методикою [1] при дуговому зварюванні в середовищі захисного газу (82 % Ar, 18 % CO_2) порошковим дротом діаметром 1,6 мм типу «metalcog» на постійному струмі 200 (± 5) А, напрузі на дузі 30 (± 2) В з погонною енергією 21 (± 2) кДж/см. Для визначення характеру розподілу неметалевих включень в металі швів до «холодної» частини зварювальної ванни вводили порошковий дріт діаметром 1,6 мм, осердя якого містило суміш з 10 % частинок тугоплавких сполук розміром 0,040...0,200 мм та 90 % залізного порошку марки ПЖВ за ДСТУ 9849. В якості інокулянтів були обрані з'єднання на основі титану: оксид титану (шов TiO_2), карбід титану (шов TiC), нітрид титану (шов TiN), а також оксиди цирконію (шов ZrO_2) та магнію (шов MgO). Отримані результати порівнювали з даними зразків металу шва, отриманих при зварю-

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

© В.В. Головка, О.О. Штофель, В.А. Костін, 2023

ванні порошковим дротом, до складу осердя якого вводили феротитан (шов Base).

Відповідно до своїх фізико-хімічних показників неметалеві включення можуть впливати на формування структури в процесі охолодження металу як центри кристалізації (MgO, ZrO₂), мікроохолодильники (TiO₂), фази, що гальмують дифузію вуглецю при розпаді аустеніту (SiC, TiC). Відповідно до цього неметалеві включення справляють різний вплив на умови формування мікроструктури металу. Метою проведених досліджень було виявлення загальних особливостей бейнітної структури, які не залежать від складу неметалевих включень в металевій матриці.

Металографічні дослідження проводили на поперечних шліфах, вирізаних із зварних з'єднань. Структуру металу швів досліджували на оптичному мікроскопі «Neophot 32». Визначення вмісту структурних складових в металі швів виконували за методикою ISO 9042.

Механічні властивості металу зварних швів оцінювали за результатами стандартних випробувань відповідно до вимог ДСТУ ISO 6892-1:2019, ДСТУ EN 10045-1: 2006, ДСТУ ISO 15792-1:2009.

Результати досліджень. В табл. 1 та 2 наведено результати визначення хімічного складу та механічних властивостей металу досліджених швів, а в табл.3 вміст структурних складових в зразках зварних швів.

Виходячи з ряду фундаментальних досліджень [2, 3] видно, що бейнітна структура формується за рахунок розпаду аустеніту під час охолодження металу у вигляді голчастих структур. Голчасті структури являють собою рейки α-фази, що перетинаються під різними кутами, завтовшки від ≈0,15 до ≈0,80 мкм. У середині рейок у великій кількості є дисперсні карбіди. Субструктура рейок

неоднорідна, поряд із дислокаційними скупченнями в них присутні ділянки, відносно вільні від дефектів. Перетворення починається з появи окремих голчастих виділень дендритної будови, які за подальшого розвитку перетворення товщають і, виникаючи паралельно одне одному, утворюють пакети, формують структуру бейнітного пакету. У міру розвитку перетворення окремі голчасті пластинки товщають, шляхом дифузійного переміщення спільних границь між сусідніми голками, утворюючи масивні конгломерати з відсутністю чітких меж між окремими елементами. Субструктура голок складається з рейок α-фази завширшки від 0,75 до 1,75 мкм. В залежності від температури перетворення росту товщини голок буде перешкоджати наявність частинок цементиту Fe₃C та інших дисперсних часток, перш за все доданих до шва інокулянтів тугоплавких сполук.

В дослідженні [4], які виконані з використанням просвічуючої електронної мікроскопії, було показано, що в залежності від складу інокульованих до зварювальної ванни тугоплавких сполук ширина рейок нижнього бейніту може змінюватися в межах 0,3...1,4 мкм, а верхнього бейніту – 0,4...2,0 мкм. Зміна розмірів бейнітної фази впливає на механічні властивості металу зварних швів, але оцінити її розподіл за розмірами можливо було тільки методом кількісної металографії.

Одним із перспективних методів комп'ютерного аналізу металографічних зображень є методика фрактальної параметризації складових мікроструктури, яка була використана для оцінки розгалуженості бейнітної структури в металі досліджених швів [5].

Для обчислення фрактальної розмірності було використано клітинний метод. Згідно цього методу вхідне зображення фракталу (рис. 1, з) по-

Таблиця 1. Хімічний склад металу швів, мас. %

Номер шва	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti
Основа	0,050	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
TiO ₂	0,035	0,405	1,24	0,016	0,021	0,11	1,97	0,27	0,68	0,031	0,017
SiC	0,066	0,370	0,92	0,016	0,024	0,14	1,72	0,23	0,54	0,021	0,005
ZrO ₂	0,041	0,288	1,32	0,021	0,024	0,12	1,36	0,25	0,37	0,029	0,004
MgO	0,040	0,321	1,50	0,023	0,022	0,15	2,08	0,26	0,56	0,050	0,005

Таблиця 2. Механічні властивості металу швів

Номер шва	Rm	Re	A	Z	KCV, Дж/см ² при T, °C			
	МПа		%		20	0	- 20	- 40
Основа	788	739	11,4	35	60	58	57	52
TiC	716	644	19	63	111	97	85	73
TiN	712	580	5,3	14,7	55	47	40	35
TiO ₂	709	636	19	57	85	72	60	50
SiC	775	729	18	60	55	49	44	36
ZrO ₂	649	592	21	64	97	91	84	76
MgO	644	586	19	60	103	85	69	60

Таблиця 3. Вміст (%) структурних складових в металі швів

Номер шва	Бейніт верхній	Бейніт нижній	Ферит полігональний	Мартенсит
Основа	52,0	31,8	9,2	10,8
TiC	22,2	60,8	6,0	9,5
TiN	21,0	57,8	9,8	9,9
TiO ₂	28,0	54,6	5,6	9,7
SiC	25,0	55,5	9,2	9,3
ZrO ₂	22,3	62	5,7	8,9
MgO	25,6	58	6,2	8,7

кривають сітками з квадратними клітками із значеннями кроку сітки d ($0,0377 \times 0,0377$ мкм) і підраховують кількість кліток $N(d)$, які покривають досліджувану фрактальну фігуру. Фрактальну розмірність зображення D визначають внаслідок апроксимації отриманого набору точок за допомогою методу найменших квадратів за виразом

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

Для проведення фрактального аналізу були відібрані по п'ять оптичних зображень вторинної структури при збільшенні $\times 320$ та $\times 1000$ для кожного зразка металу шва (рис. 1, а, б). Після комп'ютерної обробки зображень за програмою ImageJ було отримано бінаризовані зображення відповідних структур (рис. 1, в, г), для яких визначали фрактальний параметр D . Результати фрактальної параметризації наведено в табл. 4.

Фрактальні об'єкти мають як мінімум дві важливі якості: масштабну інваріантність і самоподібність

та 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 розгалуження границь зерен у структурі металу швів в залежності від використаних збільшень ($\times 320$ та $\times 1000$).

Наведені в табл. 4 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 можливість використання фрактальної параметризації для оцінювання структури металу швів.

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

Таблиця 4. Фрактальні параметри розгалуження границь зерен, отримані в результаті аналізу оптичних зображень структури металу швів

Номер шва	Фрактальний параметр D		
	Збільшення		Відхилення
	$\times 1000$	$\times 320$	$D_{\times 1000}/D_{\times 320} \%$
TiN	0,5158	0,5159	1,00
SiC	0,5177	0,5151	1,01
Основа	0,5244	0,5194	1,01
TiC	0,5329	0,5258	1,01
ZrO ₂	0,5479	0,5737	0,95
MgO	0,5510	0,5244	1,05

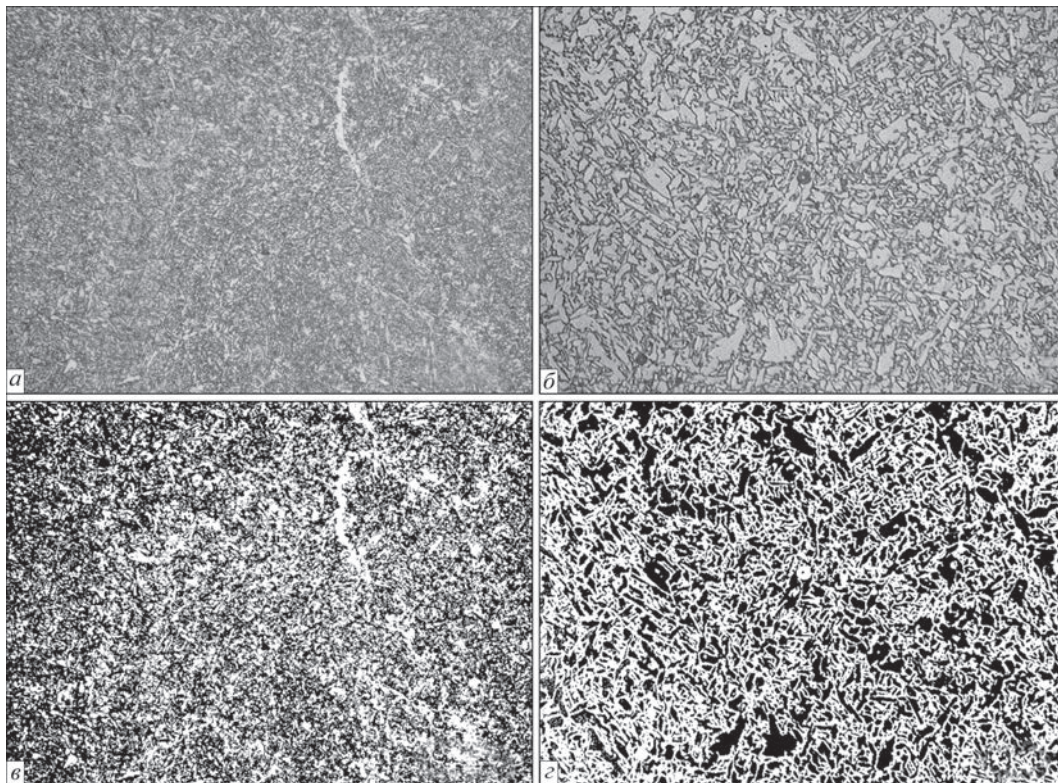


Рис. 1. Мікроструктура металу швів без використання інокулянтів (а – $\times 320$, б – $\times 1000$) та відповідні бінаризовані зображення (в – $\times 320$, г – $\times 1000$)

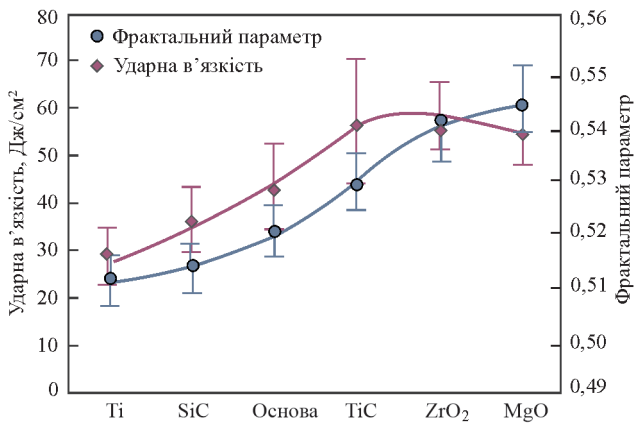


Рис. 2. Співставлення показників ударної в'язкості при температурі випробування – 40 °С з фрактальним параметром розгалуження границь зеренної структури металу швів

ни, в умовах, далеких від рівноважних, в металі зварних швів зазвичай формується полікристалічна структура, зерна якої у залежності від умови зростання, зіткнення та рекристалізації мають довільну форму. Бейнітна структура металу швів ВМНЛ сталей характеризується голчатою морфологією. Показники міцності, пластичності та в'язкості визначаються кристалографічною орієнтацією бейнітних зерен та морфологією голчатих утворень (їх розміром, орієнтацією, відношенням ширини до довжини).

Для визначення кристалографічної орієнтації зерен традиційно використовують або методи просвічуючої електронної мікроскопії, або методи рентгеноструктурного аналізу (аналіз EBSD, аналіз Кікучі ліній). Використовуючи ці методи можливо визначити розорієнтацію зерен, побудувати карти багато- та малокутових границь, визначити енергію границь зерен, та встановити вплив морфології голчатої структури через показник розгалуженості її границь. Дрібнодисперсна структура з більш високою розгалуженістю границь зерен характеризується, як правило, більш низькою швидкістю розвитку тріщин і підвищеним рівнем показників в'язкості металу [2].

На рис. 2 наведено результати співставлення фрактальних параметрів розгалуження границь зерен, які були отримані при аналізі оптичних зображень структури ($\times 1000$) з показниками ударної в'язкості металу швів при температурі випробування – 40 °С.

FRactal parametrization of branching bainitic structure of weld metal of high-strength low-alloy steels

V.V. Golovko, O.O. Stofel, V.A. Kostin

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The results of the study on determination of the possibility of evaluating the parameters of bainitic structure of weld metal of high-strength low-alloy steels by the method of fractal analysis. The ability of evaluating the branching of bainitic structure using the fractal parameter $D = \ln(d)/\ln N(d)$ is shown, where d is the size of a square cell, and $N(d)$ is a number of cells that cover the studied fractal figure. For the investigated specimens, a correspondence between the fractal parameter of branching bainitic structure and the value of toughness of the weld metal was established. 5 Ref., 4 Tabl., 2 Fig.

Keywords: welding, low-alloy steel, microstructure, branching of bainitic structure, fractal analysis

Надійшла до редакції 12.04.2023

Як видно з рис. 2, характер зміни фрактальних параметрів розгалуження границь зерен відповідає рівню в'язкості металу досліджених швів. З цього можливо дійти висновку, що означений фрактальний параметр можливо використовувати при мультифрактальному аналізі структури металу зварних швів ВМНЛ сталей з метою прогнозування комплексу їх механічних властивостей.

Висновок

Проведено дослідження з розвитку методів фрактального аналізу стосовно числової параметризації структури металу швів ВМНЛ сталей. Запропоновано використання фрактального параметру границь структурних складових для оцінювання їх розгалуженості. Показано високу стохастичність фрактального параметра розгалуженості границь для оцінювання структури при трикратній зміні збільшення розмірів оптичного зображення структури. Встановлено можливість використання фрактального параметра при аналізі показників в'язкості структури металу зварних швів ВМНЛ сталей. Висловлена доцільність використання встановленого фрактального параметра для мультифрактального аналізу структури металу швів ВМНЛ сталей.

Список літератури/References

- Holovko, V.V., Yermolenko, D.Yu., Stepanyuk S.M. et al. (2020) Influence of introduction of refractory particles into welding pool on structure and properties of weld metal. *The Paton Welding J.*, **8**, 1–7.
- Bhadeshia H.K.D.H. *Bainite in steels theory and practice third edition* (2001) Maney Publishing is the trading name of W. S. Maney & Son Ltd Maney Publishing, Suite 1C, Joseph's Well, Hanover Walk, Leeds LS3 1AB, UK. 451 P.
- Грабин В.Ф., Денисенко А.В. (1978) *Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей*. Киев, Наукова думка.
Grabin, V.F., Denisenko, A.V. (1978) *Physical metallurgy of welding and low- and medium-alloy steels*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
- Yang, Hong-Seok Design of Low-Carbon, Low-Temperature Bainite, Thesis for Doctor of Philosophy, Department of Ferrous Technology Graduate Institute of Ferrous Technology Pohang University of Science and Technology, Pohang, Korea, 26 September 2011, p 170.
- Carney L.R., Mecholsky J.J. (2013) Relationship between Fracture Toughness and Fracture Surface Fractal Dimension in AISI 4340 Steel. *Materials Sciences and Applications*, **4**, 258–267.