

УДК 621.325:669.539.43

## МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОСТРУКТУРИ СТАЛІ 12Х1МФ З УРАХУВАННЯМ ЇЇ РІЗНОЗЕРНИСТОСТІ

І. М. ЖУРАВЕЛЬ, Л. З. МИЧУДА

*Національний університет "Львівська політехніка"*

Розроблено метод моделювання меж зерен мікроструктури сталі 12Х1МФ на основі усередненого діаметра зерен металу та врахування його різнозернистості. Для візуалізації запропонованої моделі зеренної структури сталі 12Х1МФ застосовано діаграми Вороного. Метод перевірено із використанням фрактальних розмірностей. Встановлено, що фрактальні розмірності зображень меж зерен реального та модельованого зображень відрізняються на 1,12%.

**Ключові слова:** *металографічне зображення, усереднений діаметр зерна металу, різнозернистість матеріалу.*

A method for modeling the microstructure of steel by the average grain diameter of the metal and its different grain size is proposed. Voronoy diagrams are used for visual modeling of the grain structure of 12Х1МФ steel. The developed method provides the same metric characteristics of real and simulated images of the microstructure, namely: the average grain diameter, the number of grains in the image, the distribution histogram and others. The proposed method is verified using fractal dimensions. It is established that the fractal dimensions of the grain boundaries of real and simulated images differ by 1.12%.

**Keywords:** *metallographic image, the average diameter of the metal grain, different grain size of the material.*

**Вступ.** Спектр задач металографії є доволі різноманітним, наприклад, це дослідження впливу мікроструктурних особливостей на точкову корозію матеріалу [1] та дії водню на властивості мікроструктури [2, 3], взаємозв'язків метричних характеристик мікроструктури та механічних властивостей сталі за різних температур [4–6] і особливостей мікроструктури та механічної деградації сталей [7, 8]. Під час аналізу металографічних зображень все частіше використовують методи машинного навчання [9].

Існує також низка досліджень, які присвячені оберненим до описаних вище задач, а саме, моделюванню мікроструктури металу. Раніше досліджували [10] як мікроструктура металу залежить від його механічних характеристик. Подано [11] загальну модель для прогнозування еволюції мікроструктури металу під час фазових перетворень. Моделювання еволюції мікроструктури під час динамічної рекристалізації штампової сталі досліджено у праці [12]. Ці дослідження підтверджують актуальність задачі моделювання мікроструктури матеріалу. Їх недоліком є те, що вони під час моделювання використовують інтегральні характеристики мікроструктури, наприклад, усереднений діаметр зерна металу. Це нівелює поняття різнозернистості, тобто різниці між мінімальним і максимальним його значенням. Відомо, що різнозернистість суттєво впливає на ресурс сталей тривалої експлуатації та їх фізико-механічні властивості [13], зокрема, опір повзучості, показники пластичності та ударної в'язкості.

Раніше досліджували [13] зв'язок границі плинності і твердості від розміру зерна металу, який описують, в загальному випадку, відомим співвідношенням Холла–Петча. Оскільки твердість і характеристики міцності металу пов'язані між собою, то логічно очікувати відповідності їх зміни зі зміною розміру зерна. Проте оцінювання твердості не виявило її однозначного зв'язку з розміром зерна. Однією з можливих причин такої невідповідності є те, що у виразі Холла–Петча використовують значення усередненого діаметра зерен металу та не враховано його різнозернистість.

Мета дослідження – змодельовати мікроструктуру сталі 12Х1МФ з урахуванням її різнозернистості.

**Результати та їх обговорення.** Для моделювання мікроструктури використано експериментальні результати про структуру (рис. 1) і усереднений діаметр зерна  $d$  сталі 12Х1МФ [13], які отримані для шліфів, вирізаних на віддалі 2,5; 5 та 9 mm від внутрішньої поверхні труби з цієї сталі.

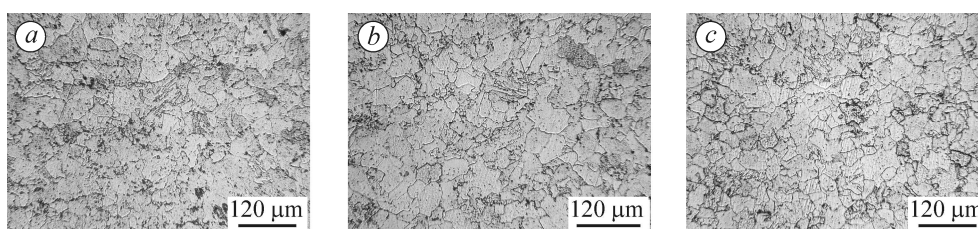


Рис. 1. Мікроструктура сталі 12Х1МФ на віддалі  $t$  від внутрішньої стінки труби:  
 $a - t = 2,5$  mm;  $b - t = 5$ ;  $c - t = 9$  mm.

Fig. 1. Microstructure of 12X1MF steel at distance  $t$  from the inner wall of the pipe:  
 $a - t = 2,5$  mm;  $b - t = 5$ ;  $c - t = 9$  mm.

На основі значень усередненого діаметра  $d$  обчислено середнє значення площі  $\bar{S}$  перерізу зерна на шліфі металу (табл. 1).

**Таблиця 1. Метричні характеристики зображення меж зерен сталі 12Х1МФ**

Віддаль від внутрішньої поверхні труби $t$ , mm	2,5	5	9
Усереднений діаметр зерна $d$ , $\mu\text{m}$	26	23	22
Усереднене значення площі зерна $\bar{S}$ , $\mu\text{m}^2$	531	415	380
Максимальна кількість зерен металу $N_{\text{max\_im}}$ на зображенні шліфа за заданої площі $\bar{S}$ зерна	508	651	710

Задамо масштаб модельованого зображення мікроструктури. Оскільки результати моделювання порівнюватимуться із мікроструктурою сталі 12Х1МФ (рис. 1), то доцільно встановити для модельованого зображення аналогічний масштаб, а саме – 2 pixels відповідають 1  $\mu\text{m}$ .

Розміри зображень на рис. 1 дорівнюють 1200 на 900 pixels, тому їх площа  $S_{\text{image}} = 2,7 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$ . Моделюємо зображення такої ж площі  $S_{\text{image}}$ . Врахувавши усереднену площу зерна  $\bar{S}$ , обчислили максимальну кількість зерен металу  $N_{\text{max\_im}}$  на модельованому зображенні (табл. 1).

Усереднений діаметр зерна металу  $d$  та обчислені вище параметри (табл. 1) не надають вичерпної інформації для моделювання реальної мікроструктури металу. Відомо, що метал містить зерна різних розмірів. Їх розподіл має гіперболічний характер та описується законом Мандельброта–Ципфа [14]. Тому необхідно

визначити максимальну кількість зерен  $N_{\max}$  з деякою мінімальною площею. Загальна кількість зерен металу  $N_{\max\_im}$  для зображення мікроструктури з відомими розмірами визначена вище (табл. 1). Так, для мікроструктури з усередненим діаметром зерен  $d = 26 \mu\text{m}$  загальна кількість зерен рівна  $N_{\max\_im} = 508$ , де  $N_{\max\_im} = 1 + 2 + 3 + \dots + N_{\max}$ . Застосовуючи вираз для арифметичної прогресії, обчислили  $N_{\max} = 31$ . Для мікроструктури з іншим усередненим діаметром  $d$  розрахунки будуть аналогічними.

З виразу

$$\bar{S} = \frac{C \cdot \ln N_{\max}}{N_{\max}} \quad (1)$$

обчислюють параметр, який кількісно характеризує форму розподілу  $C$  [3]

$$C = \frac{\bar{S} \cdot N_{\max}}{\ln N_{\max}} \quad (2)$$

За виразом (2) для мікроструктури на рис. 1а знаходимо, що  $C = 4,79 \cdot 10^{-9}$ . Параметр  $C$  є сталим для зображень одного шліфа [9] та рівний добутку кількості зерен  $N_i$  з різною площею на їх площу  $S_i$ :

$$N_i \cdot S_i = C \quad (3)$$

Вище обчислено, що кількість можливих варіантів розмірів зерен становить 31, тобто  $i = 1 \dots 31$ , а загальна кількість зерен на зображенні мікроструктури металу за заданого масштабу  $N_{\max\_im} = 508$ .

Отже, в результаті дослідження встановлено основні кількісні та метричні параметри мікроструктури металу для заданого усередненого діаметра зерна  $d$  із врахуванням різнозернистості.

Основою візуального подання мікроструктури сталі є взаємозв'язок кількості різновеликих зерен  $N_i$  з їх площею  $S_i$  за залежністю (3), кількість можливих варіантів розмірів зерен та загальна кількість зерен  $N_{\max\_im}$  на зображенні мікроструктури сталі 12Х1МФ за заданого масштабу.

Візуальне моделювання зеренної структури сталі 12Х1МФ (рис. 2) реалізовано за допомогою діаграм Вороного [15]. При цьому враховано усі подані вище параметри математичної моделі мікроструктури.

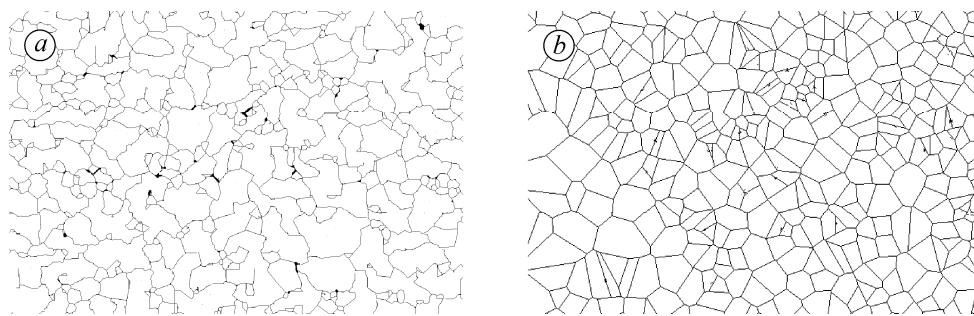


Рис. 2. Межі зерен (а) металографічного зображення (рис. 1а) та їх модельне подання (b).

Fig. 2. Grain boundaries (a) of the metallographic image (Fig. 1a) and their model representation (b).

Межі зерен (рис. 2а) реального металографічного зображення сталі 12Х1МФ та їх модельне подання (рис. 2b) мають однакові метричні характеристики мікроструктури – усереднений діаметр зерна, розподіл зерен металу за їх площами, за-

гальна кількість зерен тощо. Аналогічні моделі мікроструктури, згідно із запропонованим підходом, реалізовані також для металографічних зображень, поданих на рис. 1b та c.

Для верифікації запропонованого підходу до моделювання меж зерен сталі 12X1МФ обчислили коефіцієнт кореляції та фрактальні розмірності [16] меж зерен металографічного зображення та відповідного їм модельного подання (табл. 2). Результати обчислень фрактальних розмірностей формували за найкращою збіжністю клітинного та крапкового методів [11].

**Таблиця 2. Фрактальні розмірності меж зерен сталі 12X1МФ та їх модельних подань**

Зображення Параметр	Рис. 1a	Рис. 1b	Рис. 1c
Коефіцієнт кореляції між зображеннями меж зерен сталі та відповідними модельними поданнями	0,68	0,7	0,71
Зображення меж зерен сталі 12X1МФ	1,79	1,89	1,93
Модельне подання	1,77	1,88	1,91

Коефіцієнт кореляції між зображеннями меж зерен мікроструктури сталі та відповідного їм модельного подання знаходиться в межах від 0,68 до 0,71. Відмінність отриманих результатів від 1 пояснюється тим, що під час моделювання меж зерен за допомогою діаграм Вороного застосовують прямі лінії (рис. 3) і лише потовщення меж зерен дало можливість виявити кореляційні зв'язки між вихідними та модельованими зображеннями.

Як зазначали вище, перевагою застосування діаграм Вороного під час моделювання меж зерен є те, що вони забезпечують подання мікроструктури (рис. 2b) з такими ж метричними характеристиками, які є в реальному зображенні (рис. 2a). Результати обчислень фрактальної розмірності реального та модельованого зображень меж зерен сталі 12X1МФ (табл. 2) різняться максимально на 1,12%.

### ВИСНОВКИ

Запропоновано метод моделювання мікроструктури сталі за усередненим діаметром зерен металу та його різнозернистістю. В основу візуального моделювання зеренної структури сталі 12X1МФ покладено діаграми Вороного. Розроблений метод забезпечує однакові метричні характеристики реального та модельованого зображень мікроструктури, а саме: усереднений діаметр зерна, кількість зерен на зображенні, гістограму розподілу та інші. Верифікували запропонований метод зі застосуванням фрактальних розмірностей. Встановлено, що фрактальні розмірності зображень меж зерен реального та модельованого зображень відрізняються на 1,12%.

1. Pradhan S. K., Bhuyan P., and Mandal S. Influence of the individual microstructural features on pitting corrosion in type 304 austenitic stainless steel // *Corr. Sci.* – 2019. – **158**. DOI: 10.1016/j.corsci.2019.108091.

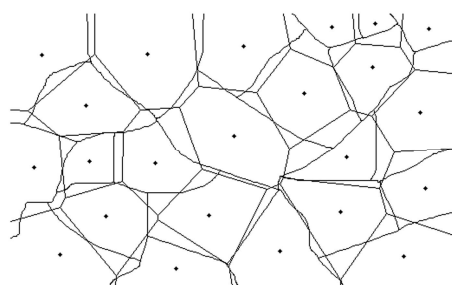


Рис. 3. Межі зерен сталі 12X1МФ з накладеними діаграмами Вороного.

Fig. 3. Grain boundaries of 12X1МФ steel with superimposed Voronoy diagrams.

2. *Ohaeri E., Eduok U., and Szpunar J.* Relationship between microstructural features in pipeline steel and hydrogen assisted degradation // *Eng. Failure Analysis.* – 2019. – **96**. – P. 496–507.
3. *Wojnar L., Kurzydowski K., and Szala J.* *Praktyka analizy obrazu.* – Krakow: Polskie Towarzystwo Stereologiczne, 2002. – 454 p.
4. *Microstructure, texture evolution and mechanical properties of X70 pipeline steel after different thermomechanical treatments / J. I. Omalea, E. G. Ohaeria, A. A. Tiamiyua, M. Eskandarib, K. M. Mostafijura, and J. A. Szpunara // Mat. Sci. and Eng. – 703.* – 2017. – P. 477–485.
5. *Кречковська Г. В., Студент О. З., Марков А. Д.* Структурні зміни в металі парогону ТЕС зі сталі 15Х1М1Ф внаслідок експлуатації // *Міжвуз. збірник “Наукові нотатки”.* – Луцьк: ЛДТУ, 2007. – Вип. 20. – С. 213–217.
6. *Effect of annealing heat treatment on the microstructural evolution and mechanical properties of hot isostatic pressed 316L stainless steel fabricated by laser powder bed fusion / K. Chadha, Y. Tian, J. G. Spray, and C. Aranas // Metals.* – 2020. – **10**, № 6. – 753 p.  
<https://doi.org/10.3390/met10060753>
7. *Features of the microstructural and mechanical degradation of long term operated mild steel / H. Kreckovska, O. Student, G. Lesiuk, and J. Correia // Int. J. of Struct. Integrity.* – 2018. – **9**, № 3. – P. 296–306. <https://doi.org/10.1108/IJSI-10-2017-0056>
8. *Nondestructive testing of the state of surfaces damaged by corrosion pitting / B. P. Rusyn, N. P. Anufrieva, N. R. Hrabov's'ka, V. H. Ivanyuk // Materials Science.* – 2014. – **49**, № 4. – P. 516–524. <https://doi.org/10.1007/s11003-014-9644-4>.
9. *Fuzzy logic analysis of parameters of dimples of ductile tearing on the digital image of fracture surface / I. Konovalenko, P. Maruschak, M. Chausov, and O. Prentkovskis // Proc. Eng.* – 2017. – **187**. – P. 229–234.
10. *Modeling and experiment on microstructure evolutions and mechanical properties in grade 600 MPa reinforcing steel rebar subjected to TempCore process / Kaushik Bandyopadhyay, Joonho Lee, Jae-Hyeok Shim, Byoungchul Hwang, Myoung-GyuLeed // Mat. Sci. and Eng.* – 2019. – **745**, № 4. – P. 39–52. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.12.079>
11. *Salsi E., Chiumenti M., and Cervera M.* Modeling of microstructure evolution of Ti6Al4V for additive manufacturing // *Metals.* – 2018. – **8**, № 8. – 633 p.  
<https://doi.org/10.3390/met8080633>
12. *Microstructure evolution modeling and simulation for dynamic recrystallization of Cr12MoV die steel during hot compression based on real metallographic image / F. Sun, D. Q. Zhang, L. Cheng, D. M. Liao, and B. Zhu // Met. Mater. Int.* – 2019. – **25**. – P. 966–981.  
<https://doi.org/10.1007/s12540-019-00249-8>
13. *Automated determination of grain geometry in an exploited steam-pipeline steel / I. M. Zhuravel', L. M. Svirs'ka, O. Z. Student, R. A. Vorobel', and H. M. Nykyforchyn // Materials Science.* – 2009. – **45**, № 3. – P. 350–357.
14. *Zhuravel' I. M. and Michuda L. Z.* Application of the Mandelbrot–Zipf law for the quantitative evaluation of the average size of steel grains // *Materials Science.* – 2021. – **57**, № 1. – P. 80–85.
15. *Журавель І. М.* Моделювання зеренної структури металографічних зображень за допомогою діаграм Вороного // *Відбір і обробка інформації.* – 2014. – 117(41). – С. 77–80.
16. *Большаков В., Волчук В., Дубров Ю.* Пути применения теории фракталов: монография. – Saarbrücken: Palmarium Acad. Publ., 2016. – 146 с.

Одержано 02.09.2021