

with non-metallic inclusions in their metal and introduce them in regulatory documents on the CCB. The results of studies of metal contamination with non-metallic inclusions will also be useful for improving the CCB production technology with the aim of producing boiler tubes of high operational reliability.

**Keywords:** undeformed continuous cast tube billet, non-metallic inclusions, silicates, film precipitation of non-metallic inclusions.

*Metalozn. obrobka met.* 2022, vol. 28(103), 50-59  
<https://doi.org/10.15407/mom2022.03.050>

УДК 620.193:621.791

## *Фрактальна розмірність і мультифрактальний аналіз структури металу зварних швів*

Головко В. В., \* доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу [v\\_golovko@ukr.net](mailto:v_golovko@ukr.net) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2117-0864>

Штофель О. О., \*\*, кандидат технічних наук, науковий співробітник, старший викладач [o.shtof@gmail.com](mailto:o.shtof@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0965-6340>

\*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ

\*\*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

*Наведено результати дослідження зв'язку між вмістом неметалевих включень в структурі металу зварних швів, механічними властивостями і фрактальною розмірністю на прикладі металу зварних з'єднань високоміцних низьколегованих сталей.*

*Доцільність виконання цієї роботи обґрунтовується тим, що, хоча якість металу визначається його структурою, наразі взаємозв'язок між такими параметрами мікроструктури як зерновий склад, мікробудова міжфазних границь і комплексом механічних властивостей зварних з'єднань в умовах навантаження під час експлуатації конструкції є надто складним і неоднозначним для теоретичного і феноменологічного опису. До сьогодні немає вичерпного розуміння механізмів і факторів, що контролюють утворення мікроструктур під час фазових перетворень, в нерівноважних умовах електродугового зварювання. Традиційні уявлення, базовані на принципах рівноважної термодинаміки, не дозволяють, зокрема, відповісти на питання про причини появи тієї або іншої морфології виділених фаз, так само як і адекватно оцінити роль кінетичних факторів формуванні структурного стану, залежність від траєкторії охолодження, які навіть у простіших випадках, більш наближених до рівноважних умов порівняно з процесами зварювання, є найскладнішою частиною проблеми.*

*Управління структуроутворенням зварних швів та визначення імовірності руйнування в існуючих конструкціях пов'язані з необхідністю коректного опису структури. Складність структури реальних металів зварних швів є основною перешкодою для синтезу адекватних моделей комп'ютерного конструювання структур і прогнозування їх властивостей.*

*Фрактальний формалізм, зокрема фрактальний і мультифрактальний аналіз, дає можливість числової параметризації структур і може стати основою для вибору чисельних адекватних моделей структур реальних зварних швів, необхідних для комп'ютерного оцінювання структур і прогнозування їх властивостей.*

*Вплив неметалевих включень може мати негативний характер і навіть становити серйозну небезпеку, оскільки концентрація в прилеглий до них металевій матриці напружень може перевищити граничні для матеріалу значення і стати осередком руйнування.*

**Ключові слова:** *фрактал, включення, мікроструктура, інокулянти, розмірність, синергетика.*

Розв'язання проблеми діагностики металічних конструкцій із заданими фізико-механічними властивостями на базі класичної тріади «склад – структура – властивість» потребує введення об'єктивних кількісних показників, що чисельно описують геометричні та статистичні особливості структури, а також відображують процеси структуроутворення у металі та пов'язують їх з характеристиками якості. Сучасний підхід до розгляду описаної задачі передбачає використання теорії фрактальних структур [1] з позицій тісно пов'язаної з нею синергетики [2].

На початковому етапі розвитку лінійної механіки руйнування, всі процеси, такі як зародження та розвиток тріщин, сприймалися як прямі відрізки та лінії. Такі тріщини описувалися через асимптотичні рівняння, а їх розвиток визначався лінійною механікою руйнування. За допомогою лінійної механіки розглядалися крихкі руйнування які відбувалися при рості тріщини без утворення пластичних деформацій матеріалу. Але згодом було виявлено, що при рості тріщини перед її вершиною завжди виникає пластична зона. При наявності пластичної деформації виникає в'язке руйнування, воно відбувається за рахунок процесу зародження, злиття і розподілу внутрішніх порожнин [3]. Отже, в'язке руйнування є більш візуальним, що і допомогло виявити фрактальну розгалужену структуру кінця тріщини. Таким чином виникла нелінійна механіка руйнувань, яка ґрунтується на нових дослідженнях поведінки і властивостей фрактальних структур [4].

Проведено ряд досліджень, що підтверджують фрактальну природу металу. По-перше, структура металу є самоподібною – це основна властивість фракталу. По-друге, при розрахунку впливу розміру структурних зерен чи неметалевих включень доцільно будувати, на основі числових методів дослідження, структури, які дають можливість кількісного аналізу впливу цих показників на механічні властивості металу. Розмір структурних зерен та неметалевих включень, їх морфологія, хімічний склад та щільність розподілу значно впливають на механічні властивості металу. Попередні дослідження з опису класичних табличних розмірів зерен структурних складових за допомогою фрактальної розмірності показали лінійну залежність [5], була продемонстрована можливість використання методу фрактального аналізу для числового моделювання властивостей металу [6]. Виходячи з цього актуальним є подальший розвиток бази наукових знань з встановлення зв'язку між параметрами структурних складових і їх фрактальною розмірністю.

Експерименти проводили на зразках металу зварних швів (рис. 1) при температурі за стандартних умов 20 °С, отриманих при зварюванні стикових з'єднань сталі 09Г2 дротом Св-08ГН2МА в середовищі захисного газу М21. З метою виявлення впливу різних за складом неметалевих включень, які були введені до рідкого металу зварювальної ванни підчас зварювання в вигляді дисперсних частинок ( $> 500 \mu\text{m}$ ) тугоплавких сполук через осердя присадкового порошкового дроту за методикою [7].



Рис. 1. Зразок зварного з'єднання сталі 09Г2.

Fig. 1. Welded joint sample of steel 09G2.

З металу зварних швів вирізали темплети для виготовлення зразків для визначення хімічного складу і механічних властивостей металу відповідно до вимог ДСТУ ISO 15792-1-2009, ДСТУ ISO 15792-1-2009 та ДСТУ ISO 10045-1-2006, а також зразки для проведення металографічного аналізу.

Результати спектрального аналізу хімічного складу досліджених зразків металу швів наведено в табл. 1.

Розроблено і реалізовано методику, яка в цілому складається з трьох виконуваних послідовно етапів [8]:

- Отримання двовимірних мікроскопічних зображень основних зон зварного з'єднання за допомогою спорядженого фотокамерою електронного сканувального мікроскопа JSM35CF (Японія) та попередня обробка цих зображень.

- Комп'ютерний розрахунок певних фрактальних характеристик зображення досліджуваних структур за допомогою спеціального програмного забезпечення.

## Методи дослідження та контролю якості металів

Таблиця 1

Хімічний склад зразків металу досліджених швів із додаванням інокулянтів

Table 1

Metal samples chemical composition from the examined seams with inoculants

| Назва шва<br>згідно<br>доданого<br>інокулянта | C     | Si    | Mn   | S     | P     | Ni   | Mo   | Al    | Ti    |
|-----------------------------------------------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|
| Base                                          | 0,088 | 0,680 | 1,57 | 0,012 | 0,010 | 0,13 | 0,08 | 0,015 | 0,004 |
| TiC                                           | 0,054 | 0,263 | 1,28 | 0,025 | 0,011 | 2,22 | 0,26 | 0,035 | 0,009 |
| TiN                                           | 0,035 | 0,317 | 1,40 | 0,019 | 0,009 | 2,29 | 0,26 | 0,036 | 0,011 |
| SiC                                           | 0,066 | 0,270 | 0,92 | 0,016 | 0,024 | 1,72 | 0,23 | 0,021 | 0,005 |
| TiO <sub>2</sub>                              | 0,035 | 0,405 | 1,24 | 0,016 | 0,021 | 1,97 | 0,27 | 0,031 | 0,027 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                | 0,034 | 0,324 | 1,12 | 0,017 | 0,023 | 2,15 | 0,29 | 0,032 | 0,025 |

• Встановлення статистично надійних зв'язків одержаних фрактальних характеристик з механічними властивостями (табл. 2).

Таблиця 2

Механічні властивості металу швів та фрактальна розмірність їх структурного складу ( $D_1$ )

Table 2

Weld metal mechanical properties and the fractal dimension ( $D_1$ ) of their structural composition

| Назва шва<br>згідно доданого<br>інокулянта | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | KCV, Дж/см <sup>2</sup> | $D_1$ |
|--------------------------------------------|------------------|----------------------|-------------------------|-------|
| Base                                       | 685              | 610                  | 73                      | 0,893 |
| TiC                                        | 715              | 644                  | 112                     | 0,928 |
| TiN                                        | 712              | 580                  | 55                      | 0,910 |
| SiC                                        | 726              | 650                  | 85                      | 0,907 |
| TiO <sub>2</sub>                           | 709              | 636                  | 85                      | 0,921 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>             | 728              | 621                  | 82                      | 0,919 |

Усереднені результати з не менш ніж трьох випробувань для визначення механічних властивостей металу зварних швів, а також результати фрактального аналізу їх структурних складових, який дає можливість знайти взаємозв'язок між структурними складовими (включеннями, розгалуженням границь, розмірами лакун) та механічними характеристиками відповідних зразків, наведено в табл. 2.

Зразки металу досліджуваних зварних швів підготовували за стандартними процедурами пробопідготовки для металографічного аналізу.

Мінімальна роздільна здатність зображення становила 300х300 пікселів. Попередня обробка зображення полягала в застосуванні до нього процедури бінаризації (рис. 2).

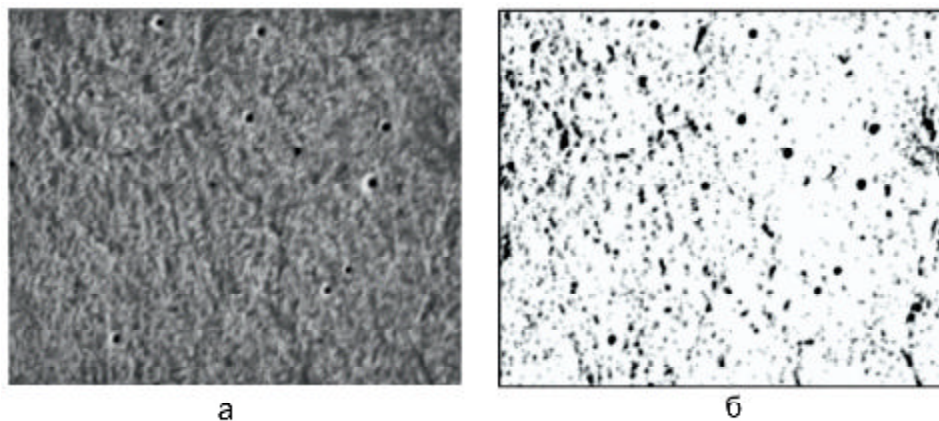


Рис. 2. Електронно-мікроскопічне зображення зразка металу зварного шва. а – вихідне зображення, б – бінаризоване. ×600.

Fig. 2. Weld metal sample electron microscopic image of the: а – original image, б – binarized. ×600.

Обране бінарне зображення далі підлягало комп'ютерній обробці за спеціально розробленим алгоритмом, який дозволяє в кінцевому підсумку обчислити фрактальну розмірність структурної складової (рис. 3), як однієї із мультифрактального спектру Реньї [9]. Мультифрактальний спектр

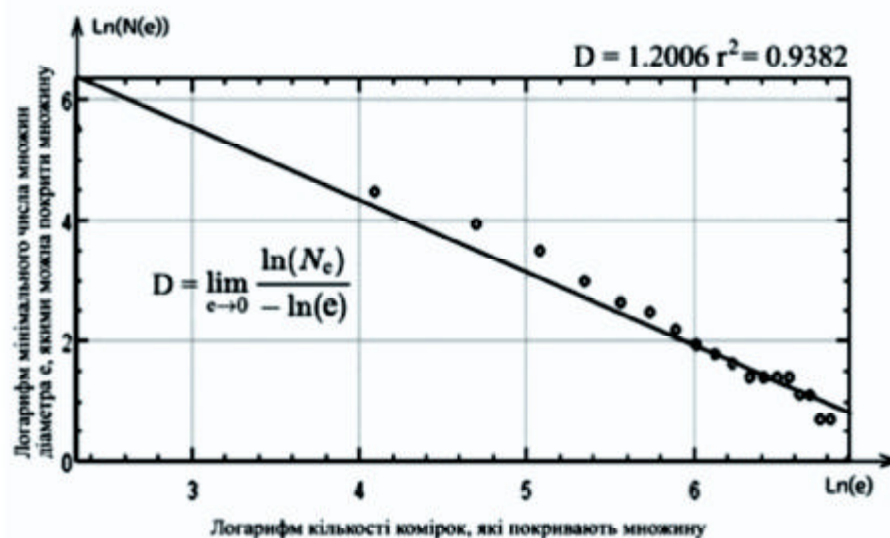


Рис. 3. Обрахунок фрактальної розмірності структурної складової, як однієї із мультифрактальних розмірностей Реньї для зразків металу швів (коефіцієнт кореляції дорівнює 0.94).

Fig. 3. Fractal dimension calculation of the structural component weld metal samples as one of the multi-fractal dimensions (Rényi dimensions) (correlation coefficient is 0.94).

представляє собою набір фрактальних розмірностей і, зокрема, звичайну фрактальну розмірність  $\alpha$  (Хаудорфа-Безіковича) як грубу характеристику мультифракталу (рис. 4), його інформаційну та кореляційну розмірності, а також, ступінь упорядкованості та міру однорідності структури зварного шва.

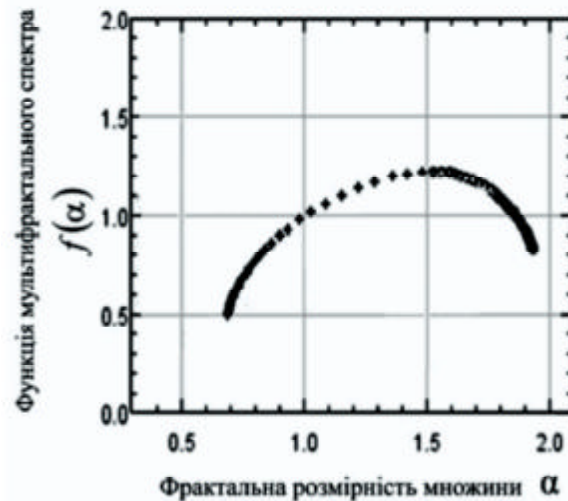


Рис. 4. Графік мультифрактального спектра  $f(\alpha)$  для зразків металу швів.

Fig. 4. Graph of the multifractal spectrum  $f(\alpha)$  for weld metal samples.

На рис. 5 наведено результати співставлення фрактальної розмірності неметалевих включень в структурі досліджених швів з показником ударної в'язкості металу швів. Наведені дані свідчать про неоднозначний вплив неметалевих включень на ударною в'язкістю металу досліджених швів. Це може бути пов'язано з особливостями впливу нітридних неметалевих включень на формування мікроструктури та характер розподілу нітридів в мікроструктурі металу швів сталей.

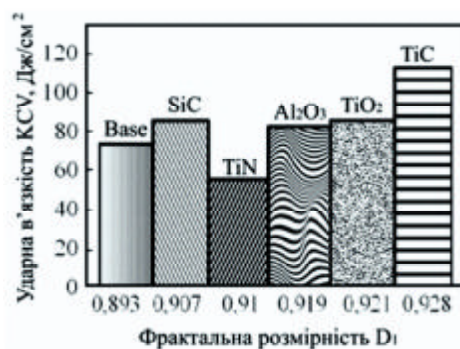


Рис. 5. Залежність фрактальної розмірності включень в зразках і ударною в'язкістю металу швів.

Fig. 5. Histogram of the fractal dimension of inclusions in the weld metal samples and the impact viscosity.

З наведених на рис. 6 даних видно певну залежність між фрактальною розмірністю неметалевих включень та характеристикою міцності металу швів, що цілком відповідає результатам досліджень, відповідно з якими зростання вмісту дисперсних тугоплавких неметалевих включень (підвищення фрактальної розмірності) на границях зерен супроводжується падінням показників міцності металу.

Отримані в роботі статистичні моделі, що пов'язують такий структурний показник, як вміст неметалевих включень і механічні властивості металу зварного шва, зокрема границю міцності і ударну в'язкість з фрактальними (тобто структурними) характеристиками свідчить, з одного боку, про можливість числової об'єктивної оцінки впливу особливостей

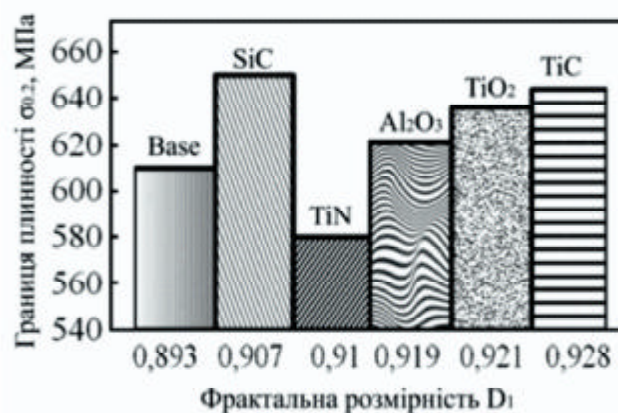


Рис. 6. Залежність фрактальної розмірності включень в металі від ударної в'язкості при температурі.

Fig. 6. Histogram of the fractal dimension of inclusions in the weld metal samples and the yield strength.

формування структурних складових на механічні властивості металу зварних з'єднань, а з іншого, про необхідність більш детального аналізу фрактальної розмірності таких різних характеристик структури металу як морфологія зерен, розгалуженість міжзерених границь, щільність розподілу неметалевих включень в твердому розчині тощо, і побудові на їх основі мультифрактальної залежності.

Таким чином в результаті проведених досліджень показано, що застосування фрактального формалізму для аналізу включень на зразках металу зварних швів дозволяє отримати інформацію щодо вмісту неметалевих включень в металевій матриці у числовому вигляді (кількісно оцінити ступінь дисперсності, фрагментарності), використання якої при комп'ютерному моделюванні вихідних характеристик зварних швів дає можливість розробки відповідних моделей прогнозування на базі об'єктивних числових даних;

При цьому власне залучення фрактальної і мультифрактальної параметризації виступає як істотна частина комплексного підходу до розв'язання проблеми створення технологічних процесів зварювання, що забезпечують гарантований рівень властивостей металу зварного шва

низьколегованих сталей, базованому на термодинамічному моделюванні утворення модифікованих фаз у металі шва, кінетичних законах зростання фаз в умовах високо градієнтних полів, фрактального підходу до опису структури металу шва й адекватних методик чисельної оцінки його властивостей.

## Література

1. Красікова І.Є. Нові кількісні методи визначення структури матеріалів у електронній мікроскопії. – Рукопис. Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла – Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, 2021.
2. Иванова В.М., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. – 383 с.
3. Штофель О.О. Застосування методу фрактального аналізу до вивчення структури металу // Науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів». – 2019. № 3. – С. 40-46. <https://doi.org/10.15407/mom2019.03.040>.
4. Штофель О.О., Головка В.В., Чижська Т.Г. Застосування фрактального та металографічного аналізів для оцінки якості металу зварних швів // Автоматичне зварювання. – 2021. – № 5. – С. 70-74. <https://doi.org/10.37434/as2021.05.11>
5. Штофель О.О. Вдосконалення методу фрактального аналізу для оцінки взаємозв'язку структури і властивостей конструкційних сталей. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16. 01 – «Металознавство та термічна обробка металів». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Міністерство освіти і науки України, Київ, 2021.
6. Shtofel O., Holovko V., Chyzhska T. Фрактальний та металографічний аналізи як інноватика у забезпеченні якості металевої продукції. Innovative «Approaches to Ensuring the Quality of Education, Scientific Research and Technological Processes» / Publisher: Polska : Publishing House of University of Technology, Katowice, 2021. – pp. 1013-1018. ISBN 978– 83 – 957298– 6 – 7.
7. Головка В.В., Степанюк С.М., Єрмоленко Д.Ю. Дослідження впливу наноутворень в металі на формування мікроструктури зварного шва та його механічні властивості // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. – 2012. – Вып. 64– С.155- 159.
8. Головка В.В. Походня И.К. Влияние неметаллических включений на формирование структуры металла сварных швов высокопрочных низколегированных сталей // Автоматическая сварка. – 2013. – №6. С. 3-11.
9. Журавель І.М. Аналіз текстури фрактографічних зображень на основі спектра фрактальних розмірностей Реньї // Штучний інтелект, – 2013. – №1. – С. 204-208. Режим доступу: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/85224/27-Zhuravel.pdf?sequence=1>

## References

1. Krasikova I.E. *New quantitative methods of determining the structure of materials in electron microscopy*. – Manuscript. Dissertation for obtaining the degree of

- Candidate of Physical and Mathematical Sciences in the specialty 01.04.07 – Solid State Physics – Institute of Materials Science Problems named after I.M. Frantsevich National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021. [in Ukrainian].
2. Ivanova V.M., Balankin A.S., Bunin I.Zh., Oksogoev A.A. *Синергетика и фракталы в материаловедении* (Synergetics and fractals in materials science), М.: Nauka, 1994. 383 p. [in Russian].
  3. Shtofel O.O., *Metalozn. obrobka met.*, 2019, Vol. 91, No. 3, p. 40-46 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mom2019.03.040>.
  4. Stofel O.O., Golovko V.V., Chyzhska T.G., *Automatic Welding*, 2021, No. 5, p. 70-74 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.37434/as2021.05.11>
  5. Shtofel O.O. *Improvement of the method of fractal analysis to assess the relationship between the structure and properties of structural steels*. Dissertation for obtaining the scientific degree of candidate of technical sciences by specialty 05.16.01 – "Metallography and heat treatment of metals".-National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021 [in Ukrainian].
  6. Shtofel O., Holovko V., Chyzhska T. *Fractal and metallographic analysis as an innovation in quality guarantee of metal products*, Innovative «Approaches to Ensuring the Quality of Education, Scientific Research and Technological Processes», Publisher: Polska : Publishing House of University of Technology, Katowice, 2021. – pp. 1013-1018. [in Ukrainian]. ISBN978– 83 – 957298– 6 – 7.
  7. Holovko V.V., Stepaniuk S.M., Yermolenko D.Yu., *Construction, materials science, machine building: Sci. science labor*, 2012. Issue 64, pp.155-159 [in Ukrainian].
  8. Holovko V.V., Torch I.K., *Automatic Welding*, 2013, No. 6, pp. 3-11 [in Russian].
  9. Zhuravel I.M., *Artificial intelligence*, 2013, No. 1, pp. 204-208 [in Ukrainian].

Одержано 15.09.22

**Holovko V. V., Shtofel O. O.**

## **Fractal dimension and multifractal analysis of the welds of metal structure**

### **Summary**

In the paper, the results of the investigation of the connection between the content of non-metallic inclusions in the metal structure and the fractal dimension on the example of welds of high-strength, low-alloy steels.

The work expediency is justified by the fact that, although the quality of the metal is determined by its structure, currently the relationship between such parameters of the microstructure as the grain composition, the microstructure of the interphase boundaries (for welded joints) and the performance of the structure/object under load conditions during exploitation seems too complex and ambiguous for theoretical and phenomenological description. There is no comprehensive understanding of the mechanisms and factors that control the formation of microstructures during phase transformations, especially in the conditions of electric arc welding, which are far from equilibrium characteristics at the present time.

Traditional concepts based on the principles of equilibrium thermodynamics and it doesn't allow, in particular, to answer questions about the reasons for the appearance of one or another morphology of the isolated phases, as well as to adequately assess the determining role of kinetic factors in the problem of the formation of the structural

state. The most difficult part of the problem is the dependence on the cooling trajectory, which even in simpler cases, closer to equilibrium conditions compared to welding processes.

Management of the structure formation of welds and determination of the location of failure in existing structures are connected with the need for a correct description of the structure. The complexity of the structure of real metals or welds is the main obstacle to the synthesis of adequate models for computer-aided design of the structure and prediction of their properties.

Fractal formalism, in particular, fractal and multifractal parameterization of structures, can in principle become the basis for choosing adequate numerical models of structures of real welds, necessary for computer design of structures and prediction of their properties.

The influence of non-metallic inclusions can have a negative character and even pose a serious danger, since the stress concentration can exceed the limit values for the material and the inclusion, therefore, can become a focus of destruction.

**Keywords:** fractal, inclusion, microstructure, inoculants, dimensionality, synergy.

Журнал **МОМ** внесено до Переліку наукових фахових видань України згідно з наказом Міністерства освіти і науки України №409 від 17.03.2020.

Повна назва журналу  
**"Науково-технічний журнал  
"Металознавство та обробка металів"**

Для регулярного одержання журналу потрібно перерахувати вартість заказаних номерів на розрахунковий рахунок Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України.

Вартість одного номера журналу - 50 грн., передплата на рік – 200 грн.  
Доступні також архівні номери журналу, починаючи з 1995 р.

**Розрахунковий рахунок для передплатників,  
спонсорів і рекламодавців:**

р/р UA828201720313251001201012215,  
банк ДКСУ в м. Києві код банку 820172

Отримувач - ФТІМС НАН України, код ЄДРПОУ 05417153,  
з посиланням на журнал "МОМ"

Копію документа передплати та відомості про передплатника  
**просимо надсилати до редакції,**  
вказавши номер і дату платіжного документа.