

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 519.21

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2025.110.0.7

ПРОГНОЗ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

Глушкова Д. Б.¹, Волчук В. М.², Рукавишніков Ю. В.¹¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет²Придніпровська державна академія будівництва та архітектури

Анотація. У дослідженні проведено кількісний аналіз мікроструктурної однорідності вуглецевих сталей після різних умов термічного оброблення з використанням мультифрактального підходу. Визначено розміри ділянок з однорідним розподілом структурних компонентів, у межах яких фрактальна розмірність залишається стабільною: $5,4 \times 5,4$ мкм для пластинчастого перліту, $6,1 \times 6,1$ мкм для перліту в поєднанні із залишковим аустенітом та $4,6 \times 4,6$ мкм для мартенситу. Встановлено зв'язок між фрактальними характеристиками мікроструктури та твердістю матеріалу за шкалою Роквелла (HRC), що відображає залежність механічних властивостей від структурної організації. Порівняння результатів, отриманих за допомогою традиційних методів металографічного аналізу та мультифрактального підходу, засвідчило їх взаємодоповнюваність, а також вищу чутливість мультифрактального аналізу до таких змін у мікроструктурі, як локальні дефекти й фазові перетворення. Застосування цифрових технологій мультифрактального аналізу відкриває нові перспективи для вдосконалення режимів термічного оброблення, прогнозування фізико-механічних характеристик вуглецевих сталей і підвищення їхньої експлуатаційної надійності в промислових умовах.

Ключові слова: мультифрактальний аналіз, перліт, залишковий аустеніт, вуглецева сталь, твердість, прогноз.

Вступ

Механічні випробування є основним процесом для визначення властивостей вуглецевих сталей, проте прямі методи, зокрема випробування на розтягування чи твердість, часто є трудомісткими, дорогими та такими, що потребують спеціального обладнання. Ці методи ускладнені необхідністю підготовки зразків, тривалим часом тестування та значними витратами, що обмежує їх застосування в масовому виробництві чи швидкому контролі якості. Крім того, структура вуглецевих сталей суттєво змінюється під впливом різноманітних видів термічного оброблення, що впливає на їхні механічні характеристики. Це визначає потребу в розробленні нових і більш ефективних підходів до аналізу структури та властивостей металів, які дозволять швидко й точно прогнозувати поведінку вуглецевих сталей у різних умовах.

Аналіз публікацій

Структурна неоднорідність металів і сплавів істотно впливає на їхні фізико-механічні властивості, визначаючи якість металопрокату й залишковий ресурс металоконструкцій [1–4]. Традиційні методи термі-

чного оброблення, зокрема відпал і загартування, дозволяють частково усунути неоднорідність, але експлуатаційні фактори (високі температури, агресивні середовища, динамічні навантаження) сприяють її повторному виникненню.

Для визначення неоднорідності в умовах виробництва використовуються стандартні шкали, засновані на візуальному аналізі структури зерна, розподілу карбідів і смугастості. Однак ці методи обмежуються якісним аналізом і не завжди враховують кількісні характеристики нерівноосних частинок і їх просторовий розподіл, що вимагає розроблення нових підходів [5–8].

Структура на нанорівні також неоднорідна [9, 10]. Для визначення структури, властивостей і технологічних процесів використовуються методи математичного аналізу [11], цифрові нейронні мережі [12] й інші передові методи.

У цій роботі запропонований метод кількісного визначення мікроструктурної неоднорідності сталей з використанням теорії фракталів [13, 14] і мультифрактального аналізу [13, 14]. На відміну від традиційних підходів, заснованих на якісних характеристиках, метод аналізує розподіл пікселів на циф-

рових зображеннях мікроструктури в двовимірному просторі [15]. Це дає можливість виявити взаємозв'язок між мікроструктурними компонентами та фізико-механічними властивостями матеріалу.

Мета та постановка завдання

Метою є розроблення методу визначення рівня твердості вуглецевої сталі на основі аналізу продуктів розпаду аустеніту з використанням мультифрактального аналізу.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

1 здійснити процеси термічного оброблення вуглецевої сталі, охолодження в різних середовищах та мікроструктурного аналізу;

2 здійснити мультифрактальний аналіз пластинчатого перліту й мартенситу, залишкового аустеніту з метою визначення зв'язку з показниками твердості вуглецевої сталі;

3 реалізувати можливість прогнозування твердості вуглецевої сталі способом побудови математичних моделей з використанням мультифрактальних показників структури сталі.

Матеріал і методи дослідження

Матеріалом для дослідження була вибрана вуглецева сталь У8, яка використовується для виробництва інструментів загального призначення, що в процесі експлуатації піддаються динамічним навантаженням. Це сприяє виникненню конструктивної неоднорідності й істотно впливає на їхні експлуатаційні характеристики.

Актуальність вибору сталі У8 полягає в тому, що в процесі експлуатації вироби з неї (різці, пили, ролики вальцовані, стамески тощо) піддаються динамічним навантаженням, які викликають розвиток структурної

неоднорідності, що впливає на службові властивості [16].

Для дослідження були взяті зразки сталі У8 без термічного оброблення, хімічний склад (% від маси) яких наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад сталі У8 у % від маси

<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>
0,81 %	0,17 %	0,25 %	0,17 %
<i>Ni</i>	<i>P</i>	<i>Cr</i>	<i>S</i>
0,25 %	0,30 %	0,20 %	0,03 %

Зразки були виготовлені довжиною 40 мм і перетином 5×5 мм. У таблиці 2 наведені режими їх термічного оброблення та твердість. Для проведення досліджень були вибрані три режими.

Час витримки під час нагрівання в печі для всіх зразків становив 30 хвилин. Для підвищення достовірності результатів проводилося по три вимірювання твердості в кожній з перерахованих областей зразка від центра до краю.

Металографічні дослідження проводили за допомогою світлового мікроскопа Neophot 2 (Carl Zeiss) за збільшення ×1000. Для виявлення мікроструктури зрізи зразків сталі У8 протравлювали в чотиривідсотковому розчині азотної кислоти в етиловому спирті. Мікроструктура в центральній зоні зразків наведена на рис. 1.

Для кількісного визначення однорідності структурних елементів (перліту, аустеніту, мартенситу) використовувався мультифрактальний аналіз, заснований на обробленні цифрових зображень мікроструктури [17–19]. Це дає можливість аналізувати просторовий розподіл локальних дефектів конструктивних елементів у двовимірному просторі зразка, виражений у розмірних характеристиках.

Таблиця 2 – Режими термічного оброблення та твердість вуглецевого сплаву

№ зразка	Режим термооброблення	Розподіл твердості (HRC) від центра зразка <i>r</i>						
		край (-20 мм)	товщина 1/2 (-10 мм)	товщина 1/4 (-5 мм)	центр (0 см)	товщина 1/4 (5 мм)	товщина 1/2 (10 мм)	край (20 мм)
1	780 °С, охолодження в печі (відпал)	40	39	37	36	37	38	39
2	780 °С, гартування в маслі	69	68	67	65	66	68	68
3	780 °С, гартування у воді	75	74	73	71	72	73	75

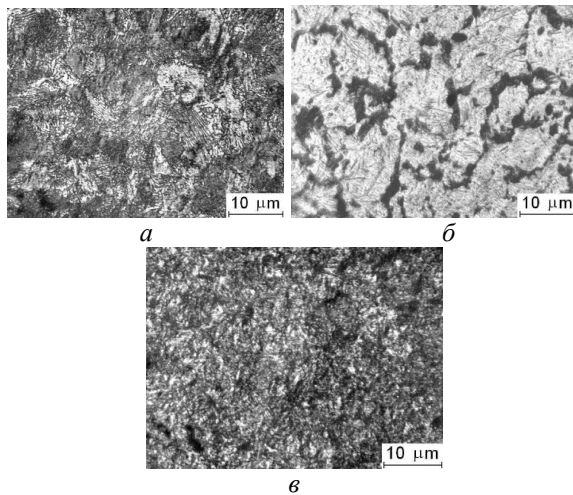


Рис. 1. Структура сталі У8: *a* – пластинчастий перліт (зразок 1); *б* – перліт, відокремлений вздовж меж колишніх аустенітних зерен + мартенсит (зразок 2); *в* – мартенсит (зразок 3)

Алгоритм мультифрактального аналізу складається з таких етапів:

1 оцифрування зображення: мікроструктуру зафіксували цифровою камерою Olympus C-50 з роздільною здатністю 510×680 пікселів у форматі 256 кольорів*.bmp (відтінки сірого);

2 дискретне наближення: мікроструктура була поділена на квадратні комірки $\varepsilon_k \times \varepsilon_k$ пікселів, де ε_k коливалася від 20 до 100 пікселів ($k = 1, 2, \dots, 17$) з кроком 5 пікселів, що дорівнює фізичним розмірам елементів конструкції від $3,53 \times 3,53$ мкм до $17,65 \times 17,65$ мкм. Розраховано ймовірність заповнення клітинок n_i та узагальнену статистичну суму

$$Z(q, \varepsilon) = \sum_{i=1}^N p_i^q \propto \varepsilon^{-\tau(q)},$$

де q – показник степеня в діапазоні від (-300) до (+300), нормалізований за формулою $\sum_i p_i = 1$;

$$3 \text{ масовий показник } \tau(q) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln Z(q)}{\ln \varepsilon}$$

визначався як міра густини клітин, заповнених пікселями, що відображає ймовірність розподілу структурних елементів. Індекс визначає області з найбільшою густиною $q = -300$ і з найменшою – $q = +300$;

4 канонічний спектр сингулярностей $f(\alpha)$ був обчислений за допомогою перетворення Лежандра $\tau(q)$: $f(\alpha) = q\alpha - \tau(q)$ де індекс

Гелдера α був визначений як $\alpha = \frac{d\tau(q)}{dq}$.

Спектр представляє розміри Хаусдорфа під-

множин мікроструктури, які є основним елементом у статистичній сумі q .

Однорідність мікроструктури визначали за відхиленням правої і лівої частин спектра від нуля (див. рис. 2 і 3). Детальний аналіз наведено в розділі «Експериментальні результати та їх обговорення».

Експериментальні результати та їх обговорення

Мультифрактальний аналіз дозволив визначити максимальні розміри областей мікроструктури, у межах яких зберігається однорідність конструктивних елементів для трьох режимів термічного оброблення сталі У8. Для зразка 1 (рис. 1 (відпал, пластинчастий перліт)) розмір сітки становив 30×30 пікселів ($5,3 \times 5,3$ мкм); зразок 2 (рис. 2 (загартування в маслі, перліт і залишковий аустеніт)) квадратної сітки покриття становив 35×35 пікселів ($6,2 \times 6,2$ мкм); для проби 3 (рис. 3 (загартування у воді, мартенсит)) – 25×25 пікселів ($4,4 \times 4,4$ мкм). Ці розміри відображають площу, в якій елементи структури зберігають свій однорідний розподіл.

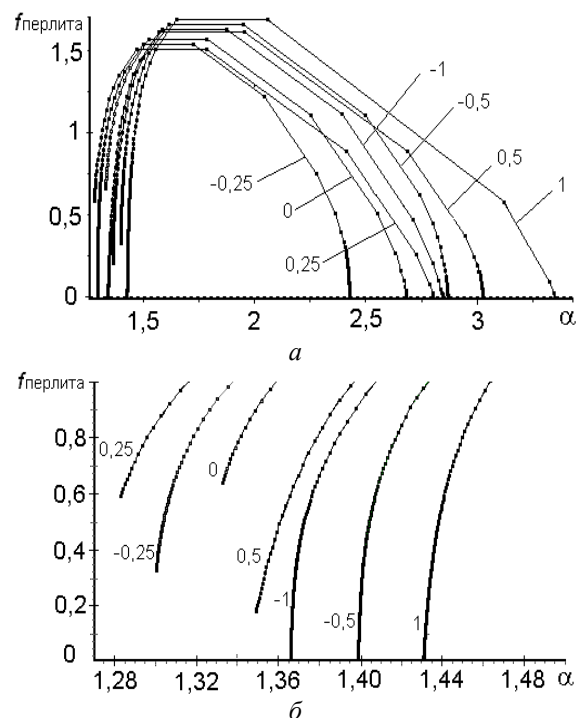


Рис. 2. Спектри мультифрактальних розмірностей, розраховані для перліту (зразок 1) на різних відстанях r , см від центра зразка (*a*) та збільшеного фрагмента лівої частини спектра (*б*)

Спектри розподілу фрактальних розмірностей, розрахованих для різних структурних компонентів, наведені на рис. 2 і 3. Для пла-

стинчастого перліту (зразок 1) спектри обчислюються на різних відстанях від центра зразка $r = 0,5, 1, 2$ см). На рис. 2а наведені спектри розподілу фрактальних розмірностей перліту, а на рисунку 2б – збільшений фрагмент лівої частини спектрів, який використовується для аналізу однорідності. Значення однорідності для перліту становили: 0,64 для $r = 0$; 0,58 та 0,32 для $r = \pm 0,5$; 0,18 для $r = 1$ і 0 для $r = 1, -2$ та 2.

Відхилення лівої частини спектра $f(\alpha)$ від нуля визначає однорідність щільноупакованих областей мікроструктури, що дорівнюють темним елементам (наприклад, перліт у зразку 1, мартенсит у зразку 3). Для мартенситу (зразок 3) однорідність становила $f = 0,44$ (рис. 3б). На противагу цьому, відхилення в правій частині спектра вказує на однорідність областей, що містять легкі елементи, зокрема залишковий аустеніт у зразку 2 ($f = 0,22$) (рис. 3а).

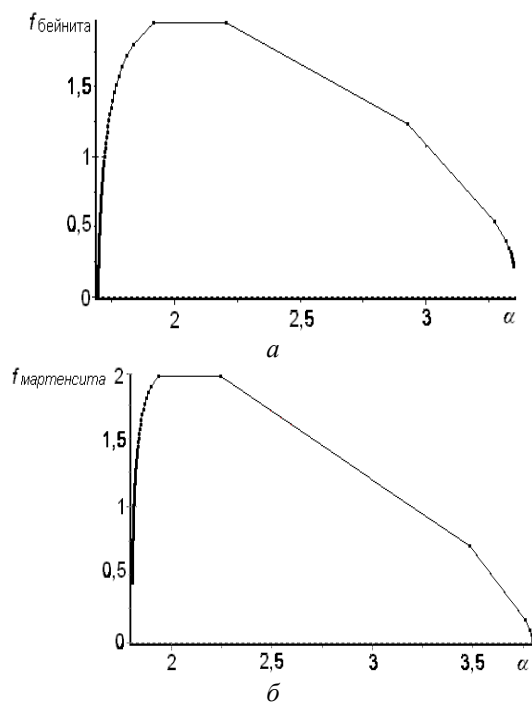


Рис. 3. Спектр сингулярності, розрахований для залишкового аустеніту на відстані $r = 20$ мм від центра зразка 2 (загартування в маслі) (а) та мартенситу на відстані $r = 10$ мм від центра зразка 3 (б) (загартування у воді)

Для визначення практичного значення результатів мультифрактального аналізу їх порівнювали з даними, отриманими традиційними методами кількісної металографії. Мікроструктура зразка 1 (рис. 1а (відпал, 780 °С, охолодження печі)) визначається високою однорідністю вздовж всього попе-

речному перерізу та складається здебільшого з пластинчастого перліту (темні ділянки) з невеликою часткою перевтектоїдного фериту 2–3% (світлі ділянки), як наведено на рис. 1а. Така структура утворюється внаслідок дифузійного перерозподілу вуглецю з аустеніту в цементит в процесі перлітного перетворення через повільне охолодження. Розміри пластинчастого перліту дорівнюють 4 балам.

Кількісне визначення однорідності пластинчастого перліту, здійснене за допомогою мультифрактального аналізу, довело його структурну чутливість. Значення однорідності змінювалося вздовж всього поперечного перерізу зразка (рис. 4а) в кореляції з твердістю (рис. 4б).

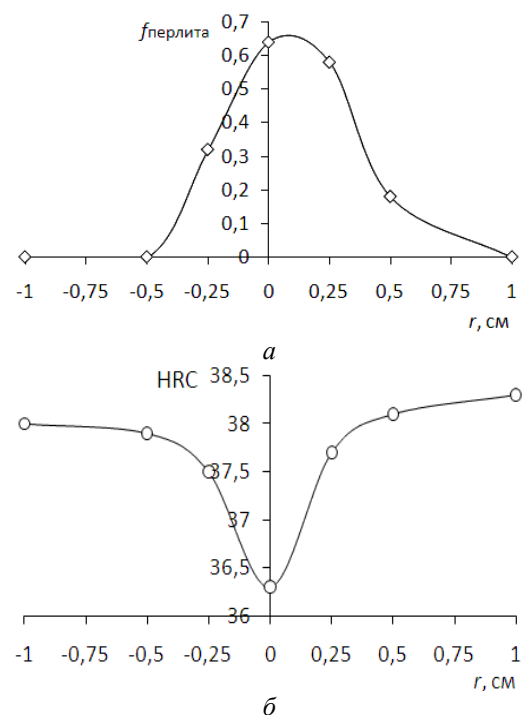


Рис. 4. Зміна однорідності пластинчастого перліту залежно від відстані вздовж поперечного перерізу зразка 1 (а); розподіл твердості вздовж поперечного перерізу зразка 1 (б)

Зменшення однорідності пластинчастого перліту від центру до краю зразка 1 (рис. 4а) пов'язане зі збільшенням локальних дефектів, що підтверджується зменшенням фрактальної розмірності перліту з 1,55 у центрі до 1,51 на краях. Це корелює зі зміною твердості (рис. 4б), яка збільшується від 36 HRC в центрі до 40 HRC на краю. Отримані дані свідчать про те, що твердість, як місцева характеристика мікрооб'єму вуглецевого сплаву, залежить від просторового дефекту мікроструктури, вираженого в розмірних одиницях мультифрактального аналізу.

Мікроструктура зразка 2 (загартування маслом, рис. 1б) складається з перліту, що виділяється по межах колишніх аустенітних зерен (темні ділянки), а також мартенситу (світлі ділянки).

Однорідність такої структури обумовлена напівдифузійним перетворенням аустеніту з частковим мартенситним перетворенням, що супроводжується дифузійним перерозподілом вуглецю.

Відмінності в швидкості охолодження по всьому поперечному перерізу зразка сприяли зміні фазового складу: частка перліту зменшилася з 16 % в центрі до 7 % на краю, а частка мартенситу збільшилася.

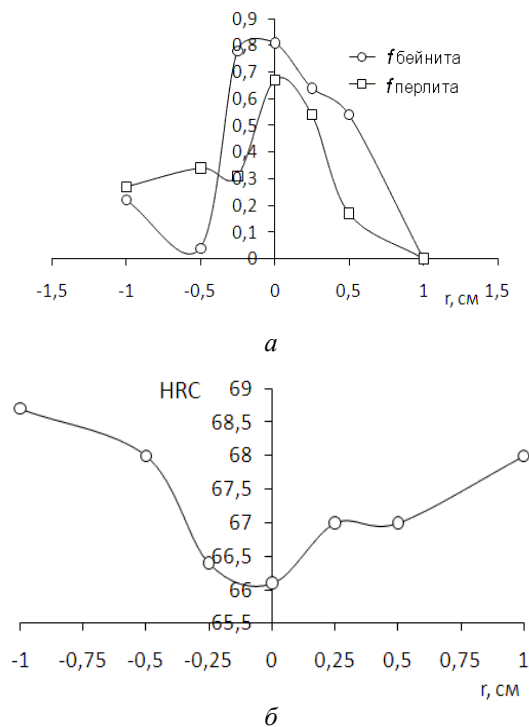


Рис. 5. Залежність однорідності мартенситу зразка 2 від відстані до центру (а) і розподілу твердості по поперечному перерізу зразка 2 (б)

Мікроструктура зразка 3 (загартування у воді, рис. 1в) складається з пластинчастого мартенситу (близько 92%, темних ділянок) і залишкового аустеніту (близько 8%, світлих ділянок) по всьому поперечному перерізу. Однорідність мікроструктури, визначена методом мультифрактального аналізу при збільшенні $\times 1000$, відображає особливості мікрорельєфу лінзоподібних мартенситних пластин, що утворилися в результаті зсувного перетворення аустеніту за рахунок кооперативного зміщення атомів. Ця морфологія пластин мінімізує енергію пружних спотворень в аустенітній матриці.

Зменшення однорідності мартенситу від центру до краю зразка (рис. 6а) може бути пов'язане зі збільшенням локальних дефектів на субструктурному рівні, що пов'язано з різницею в швидкості охолодження. Це підтверджується зменшенням фрактальної розмірності мартенситу з 1,97 в центрі до 1,74 на краю. До субструктурних змін, що впливають на дефекти, відносять збільшення густини дислокацій, збільшення внутрішніх напружень другого роду, зменшення розмірів субзерен при стабільних параметрах ґратки α -Fe. Ці зміни корелюють зі збільшенням твердості з 71 HRC в центрі до 75 HRC на краю (рис. 6б), що свідчить про покращення міцнісних властивостей від центру до поверхні зразка.

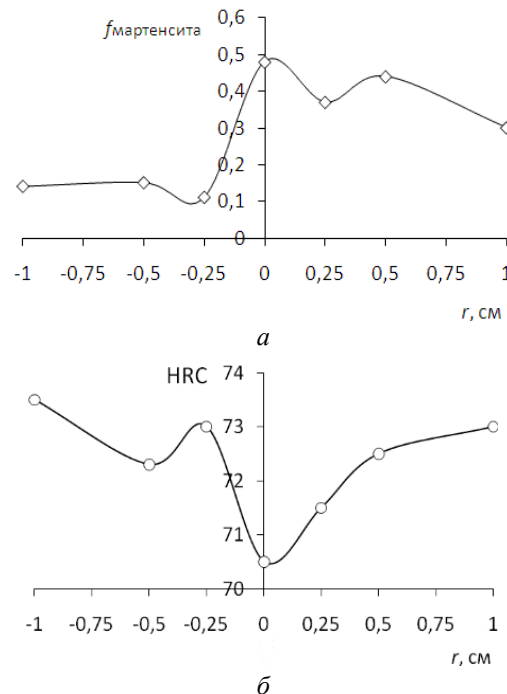


Рис. 6. Залежність однорідності мартенситу зразка 3 від відстані до центру (а) і розподілу твердості по ділянці зразка 3 (б)

Отримані результати демонструють високу чутливість твердості вуглецевого сплаву до характеристик однорідності, визначених за допомогою мультифрактального аналізу. Зокрема, зміни однорідності корелюють з твердістю через місцеві дефекти і фазовий склад.

Це підтверджує, що мультифрактальний аналіз є інструментом кількісної оцінки мікроструктури та прогнозування властивостей.

Висновки

У роботі розглядається можливість використання мультифрактального аналізу для

кількісної оцінки морфології структурних компонентів вуглецевого сплаву після різних режимів термічної обробки. Визначається однорідність структури, що виражається через просторові дефекти показників розмірностей, і встановлюються максимальні розміри областей однорідного розподілу структурних елементів.

Порівняння показників однорідності з твердістю (HRC) виявило їх кореляцію за рахунок зміни локального дефекту мікроструктури. У всіх зразках спостерігалось зниження однорідності від центру до краю, пов'язане зі збільшенням дефектів (наприклад, щільності дислокацій і внутрішніх напружень) через різницю в швидкостях охолодження. Для зразку 1 фрактальна розмірність перліту зменшилася від краю до центру з 1,55 до 1,51, для зразка 3 – мартенситу з 1,97 від краю до 1,74 в центрі, що корелювало зі збільшенням твердості на 36 до 40 HRC для зразку 1 та від 71 до 75 HRC для зразку 3 відповідно.

Показано, що мультифрактальний аналіз мікроструктури у порівнянні з традиційними методами кількісної металографії перевершує їх по чутливості до субструктурних змін і геометричної складності мікроструктури, що робить його перспективним інструментом для оцінки фізико-механічних властивостей.

Література

- G. I. Zaginaylov, V. I. Shcherbinin, K. Schuenemann, M. K. Thumme, Influence of background plasma on electromagnetic properties of "Cold" gyrotron cavity, *IEEE Transactions on Plasma Science*. 34(3). 2006. 512–517 <https://doi.org/10.1109/TPS.2006.875760>
- Y. Gutarevych, V. Mateichyk, J. Matijošius, A. Rimkus, I. Gritsuk, O. Syrota. Improving Fuel Economy of Spark Ignition Engines Applying the Combined Method of Power Regulation, Y. Shuba. *Energies*. 1020. 13(5). 1076 <https://doi.org/10.3390/en13051076>
- P. Andrenko, A. Rogovyi, I. Hrechka, S. Khovanskyi, M. Svyrenko. Characteristics improvement of labyrinth screw pump using design modification in screw, *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. 1741(1) <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012024>
- V. Maslova, R. Nastase, G. Varyasov, N. Nesterenko, E. Fourré, C. Batiot-Dupeyrat. Current status and challenges of plasma and plasma-catalysis for methane coupling: a review. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2024. 101. 101096 <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2023.101096>
- K. M. Vafaeva, M. Dhyani, P. Acharya, K. Parik, S. Ledalla. Glass-basalt-plastic materials for construction in temperate and Arctic climatic regions. *Bio Web of Conference*. 2024. 86. 01111 <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248601111>
- D. B. Hlushkova, O. D. Hrinchenko, L. L. Kostina, A. P. Cholodov. THE CHOICE OF MATERIAL FOR STRENGTHENING OF LEADING EDGES OF WORKING BLADES OF STEAM TURBINES. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2018. 1(113). 181–188.
- V. Migal, A. Lebedev, M. Shuliak, E. Kalinin, S. Arhun, V. Korohodskyi. Reducing the vibration of bearing units of electric vehicle asynchronous traction motors. *Journal of Vibration and Control*. 2021. 27. 1123–1131 <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1077546320937634>
- M. Krbata, M. Kohutiar, J. Escherova et. al. Continuous Cooling Transformation of Tool Steels X153CrMoV12 and 100MnCrW4: Analysis of Microstructure and Hardness Changes. *Applied Mechanics*. 2025. 6(1) 16. <https://doi.org/10.3390/applmech6010016>
- N. E. Kalinina, D. B. Glushkova, A. I. Voronkov, V. T. Kalinin, Influence of nanomodification on structure formation of multicomponent nickel alloys, *Functional Materials*. 2019. 26(3). 514–518 <https://doi.org/10.15407/fm26.03.514>
- D. B. Hlushkova, A. V. Kalinin, N. E. Kalinina, V. M. Volchuk, V. A. Saenko, A. A. Efimenko. STUDY OF NANOMODIFICATION OF NICKEL ALLOY GS3 WITH TITANIUM CARBIDE. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2023. 144(2). 126 <https://doi.org/10.46813/2023-144-126>
- D. Leontiev, O. I. Voronkov, V. Korohodskyi, D. Hlushkova, I. Nikitchenko, E. Teslenko, O. Lykhodii. Mathematical Modelling of Operating Processes in the Pneumatic Engine of the Car, *SAE Technical Paper*. 2020. 2020-01-2222 <https://doi.org/10.4271/2020-01-2222>
- A. I. Borovkov, K. M. Vafaeva, N. I. Vatin, I. Ponyaeva. Synergistic Integration of Digital Twins and Neural Networks for Advancing Optimization in the Construction Industry: A Comprehensive Review. *Construction Materials and Products*. 2024. 7(4). 7 <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-4-7>
- M. Rajendran, M. Arumugam, L. Sourirajan et. al. Multi-dimensional analysis of the hybrid profiled propeller of a pentacopter UAV: Aerodynamic, aero-acoustic, and structural parametric estimations utilizing synergistic engineering approaches. *Results in Engineering*. 2025. 26. 104614 <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104614>
- O. Sergiyenko, D. Hernández Balbuena, V. Tyrsa, Rosas Méndez, Patricia Luz A. Lopez M. R., W. Hernandez, M. Podrygalo, A. Gurko. Analysis of jitter influence in fast frequency measurements, *Measurement*. 2011. 44. 1229–1242 <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.04.001>

15. C. Ding, L. Jiang, J. Xu, S. Guo, J. Zhang, P. Xiong, Z. Piao. Correlation between Spatial Fractal and Temporal Chaos During the Sling Wear Process of AISI 5120 Steel, *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2025. 35(08). 2550098 <https://doi.org/10.1142/S0218127425500981>
16. P. Zhang, J. Ding, J. Guo, F. Wang. Fractal Analysis of Cement-Based Composite Microstructure and Its Application in Evaluation of Macroscopic Performance of Cement-Based Composites: a Review. *Fractal and Fractional*. 2024. 8(6). 304 <https://doi.org/10.3390/fractalfract8060304>
17. K. M. Vafaeva, N. I. Vatin, D. F. Karpov, V. Romanovski. Monitoring hybrid glass-basalt plastic pipes: a fractal approach to failure analysis. *Materials Research Express*. 2025. 12. 075307 <https://doi.org/10.1088/2053-1591/adf161>
18. D. Kakimzhanov, B. Rakhadilov, L. Sulyubayeva, M. Dautbekov. Influence of Pulse-Plasma Treatment Distance on Structure and Properties of Cr3C2-NiCr-Based Detonation Coatings. *Coatings*. 13(11). 1824 (2023). <https://doi.org/10.3390/coatings13111824>
19. Y. Wang, A. Karasev, J. H. Park, P. G. Jönsson. Non-metallic Inclusions in Different Ferroalloys and Their Effect on the Steel Quality: a Review. *Metall Mater Trans*. 2021. B 52. 2892–2925 <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02259-7>
20. D. B. Hlushkova, O. D. Hrinchenko, L. L. Kostina, A. P. Cholodov. (2018). THE CHOICE OF MATERIAL FOR STRENGTHENING OF LEADING EDGES OF WORKING BLADES OF STEAM TURBINES. *Problems of Atomic Science and Technology*, 1(113), 181–188.
21. V. Migal, A. Lebedev, M. Shuliak, E. Kalinin, S. Arhun, V. Korohodskiy. (2021). Reducing the vibration of bearing units of electric vehicle asynchronous traction motors, *Journal of Vibration and Control*, 27, 1123–1131 <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1077546320937634>
22. M. Krbata, M. Kohutiar, J. Escherova et. al. (2025). Continuous Cooling Transformation of Tool Steels X153CrMoV12 and 100MnCrW4: Analysis of Microstructure and Hardness Changes, *Applied Mechanics*, 6(1), 16 <https://doi.org/10.3390/applmech6010016>
23. N. E. Kalinina, D. B. Glushkova, A. I. Voronkov, V. T. Kalinin. (2019). Influence of nanomodification on structure formation of multicomponent nickel alloys. *Functional Materials*, 26(3), 514–518 <https://doi.org/10.15407/fm26.03.514>
24. D. B. Hlushkova, A. V. Kalinin, N. E. Kalinina, V. M. Volchuk, V. A. Saenko, A. A. Efimenko. (2023). STUDY OF NANOMODIFICATION OF NICKEL ALLOY GS3 WITH TITANIUM CARBIDE. *Problems of Atomic Science and Technology*, 144(2), 126 <https://doi.org/10.46813/2023-144-126>
25. D. Leontiev, O. I. Voronkov, V. Korohodskiy, D. Hlushkova, I. Nikitchenko, E. Teslenko, O. Lykhodii. (2020). Mathematical Modelling of Operating Processes in the Pneumatic Engine of the Car. *SAE Technical Paper*, 2020-01-2222 <https://doi.org/10.4271/2020-01-2222>
26. A. I. Borovkov, K. M. Vafaeva, N. I. Vatin, I. Ponyaeva (2024). Synergistic Integration of Digital Twins and Neural Networks for Advancing Optimization in the Construction Industry: A Comprehensive Review. *Construction Materials and Products*, 7(4), 7 <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-4-7>
27. M. Rajendran, M. Arumugam, L. Sourirajan et. al. (2025). Multi-dimensional analysis of the hybrid profiled propeller of a pentacopter UAV: Aerodynamic, aero-acoustic, and structural parametric estimations utilizing synergistic engineering approaches, *Results in Engineering*, 26, 104614 <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104614>
28. O. Sergiyenko, D. Hernández Balbuena, V. Tyrsa, Rosas Méndez, Patricia Luz A. Lopez M. R., W. Hernandez, M. Podrygalo, A. Gurko (2011). Analysis of jitter influence in fast frequency measurements. *Measurement*, 44, 1229–1242 <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.04.001>
29. C. Ding, L. Jiang, J. Xu, S. Guo, J. Zhang, P. Xiong, Z. Piao. (2025). Correlation between Spatial Fractal and Temporal Chaos During the Sling Wear Process of AISI 5120 Steel. *Internat-*

References

1. G. I. Zaginaylov, V. I. Shcherbinin, K. Schuenemann, M. K. (2006). Thumme, Influence of background plasma on electromagnetic properties of "Cold" gyrotron cavity. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 34(3), 512–517 <https://doi.org/10.1109/TPS.2006.875760>
2. Y. Gutarevych, V. Mateichyk, J. Matijošius, A. Rimkus, I. Gritsuk, O. (2020). Syrota, Improving Fuel Economy of Spark Ignition Engines Applying the Combined Method of Power Regulation, Y. Shuba. *Energies*, 13(5), 1076 <https://doi.org/10.3390/en13051076>
3. P. Andrenko, A. Rogovyi, I. Hrechka, S. Khovanskyi, M. Svyarenko (2021). Characteristics improvement of labyrinth screw pump using design modification in screw. *Journal of Physics: Conference Series*, 1741(1) <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012024>
4. V. Maslova, R. Nastase, G. Veryasov, N. Nesterenko, E. Fourré, C. Batiot-Dupeyrat. (2024). Current status and challenges of plasma and plasma-catalysis for methane coupling: a review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 101, 101096 <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2023.101096>
5. K. M. Vafaeva, M. Dhyani, P. Acharya, K. Parik, S. Ledalla. (2024). Glass-basalt-plastic materials for construction in temperate and Arctic climatic regions. *Bio Web of Conferences*, 86, 01111 <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248601111>

- tional Journal of Bifurcation and Chaos, 35(08), 2550098
<https://doi.org/10.1142/S0218127425500981>
16. P. Zhang, J. Ding, J. Guo, F. Wang. (2024). Fractal Analysis of Cement-Based Composite Microstructure and Its Application in Evaluation of Macroscopic Performance of Cement-Based Composites: a Review. *Fractal and Fractional*, 8(6), 304
<https://doi.org/10.3390/fractalfract8060304>
 17. K. M. Vafaeva, N. I. Vatin, D. F. Karpov, V. Romanovski. (2025). Monitoring hybrid glass-basalt plastic pipes: a fractal approach to failure analysis. *Materials Research Express*, 12, 075307 <https://doi.org/10.1088/2053-1591/adfl61>
 18. D. Kakimzhanov, B. Rakhadilov, L. Sulyubayeva, M. Dautbekov. (2023). Influence of Pulse-Plasma Treatment Distance on Structure and Properties of Cr3C2-NiCr-Based Detonation Coatings. *Coatings*, 13(11), 1824 <https://doi.org/10.3390/coatings13111824>
 19. Y. Wang, A. Karasev, J.H. Park, P. G. Jönsson. (2021). Non-metallic Inclusions in Different Ferroalloys and Their Effect on the Steel Quality: a Review. *Metall Mater Trans*, B 52, 2892–2925 (2021).
<https://doi.org/10.1007/s11663-021-02259-7>

Глушкова Діана Борисівна¹, д.т.н., проф., зав. каф. технології металів та матеріалознавства, diana@khadi.kharkov.ua, тел. +38 (057)707-37-29,

Волчук Володимир Миколайович², д.т.н., проф., зав. каф. матеріалознавства та обробки матеріалів, тел. +38 097-334-75-88, volchuk.volodymur@gmail.com,

Рукавишніков Юрій Васильович¹, доц. каф. будівельних і дорожніх машин,

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна,

²Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. арх. О.Петрова, 24-а, м. Дніпро, 49600, Україна

Forecasting the Mechanical Properties of Carbon Steels

Annotation. Statement of the problem. Mechanical testing is a key tool for determining the properties of carbon steels; however, direct methods, such as tensile or hardness testing, are often labor-intensive, costly, and require specialized equipment. These methods are complicated by the need for sample preparation, lengthy testing times, and significant expenses, which limit their application in mass production or rapid quality control. Furthermore, the structure of carbon steels undergoes significant changes under the influence of various types of heat treatment, which affects their mechanical properties. This highlights the need for the development of new,

more efficient approaches to evaluating the structure and properties of metals, enabling rapid and accurate prediction of the behavior of carbon steels under various conditions. **Purpose and setting of the task.** The aim is to develop a method for evaluating the hardness of carbon steel based on the analysis of austenite decomposition products using multifractal analysis. To achieve this objective, the following tasks must be accomplished: 1. Conduct heat treatment of carbon steel and perform microstructural analysis after heat treatment and cooling in various media. 2. Perform multifractal analysis of lamellar pearlite, martensite, and retained austenite to establish a correlation with the hardness properties of carbon steel. 3. Enable the prediction of carbon steel hardness by constructing mathematical models using multifractal indicators of the steel structure. **Materials and Research Methods.** The material selected for the study was U8 carbon steel, which is widely used for manufacturing general-purpose tools subjected to dynamic loads during operation. This contributes to the emergence of structural heterogeneity and significantly affects their operational characteristics. The samples were prepared with a length of 40 mm and a cross-section of 5×5 mm. Table 2 presents the heat treatment regimes and hardness values. Three heat treatment regimes were selected for the study: 780°C with furnace cooling (annealing), 780°C with oil quenching, and 780°C with water quenching. The holding time during heating in the furnace was set to 30 minutes for all samples. To ensure the reliability of the results, three hardness measurements were conducted in each of the specified sample regions, from the center to the edge. **Research material and methods.** The decrease in the homogeneity of lamellar pearlite from the center to the edge of Sample 1 is associated with an increase in local defects, as evidenced by the reduction in the fractal dimension of pearlite from 1.55 at the center to 1.51 at the edges. This correlates with the change in hardness, which increases from 36 HRC at the center to 40 HRC at the edge. The obtained data indicate that hardness, as a local characteristic of the microvolume of the carbon alloy, depends on the spatial defect of the microstructure, expressed in the dimensional units of multifractal analysis. The microstructure of Sample 2 (oil quenching) consists of pearlite, which forms along the boundaries of former austenite grains (dark areas), and martensite (light areas). The homogeneity of this structure is determined by the semi-diffusional transformation of austenite with partial martensitic transformation, accompanied by diffusional redistribution of carbon. Variations in cooling rates across the sample's cross-section contributed to changes in the phase composition: the pearlite fraction decreased from 16% at the center to 7% at the edge, while the martensite fraction increased. The microstructure of Sample 3 (water quenching) consists of lamellar martensite (approximately 92%, dark areas) and retained austenite (approximately 8%, light areas) across the entire cross-section. The decrease in mar-

tensite homogeneity from the center to the edge of the sample may be attributed to an increase in local defects at the substructural level, associated with differences in cooling rates. This is confirmed by the reduction in the fractal dimension of martensite from 1.97 at the center to 1.74 at the edge. Substructural changes affecting defects include an increase in dislocation density, an increase in second-order internal stresses, and a reduction in subgrain sizes while maintaining stable α -Fe lattice parameters. These changes correlate with an increase in hardness from 71 HRC at the center to 75 HRC at the edge, indicating an improvement in strength properties from the center to the surface of the sample. The obtained results demonstrate the high sensitivity of the hardness of carbon alloys to homogeneity characteristics determined through multifractal analysis. Specifically, changes in homogeneity correlate with hardness due to local defects and phase composition. This confirms that multifractal analysis serves as an effective tool for the quantitative evaluation of microstructure and the prediction of material properties.

Conclusions. The study explores the potential of using multifractal analysis for the quantitative evaluation of the morphology of structural components in carbon alloys subjected to various heat treatment regimes. The homogeneity of the structure, expressed through spatial defects in dimensionality indicators, is determined, and the maximum sizes of regions with homogeneous distribution of structural elements are established. A comparison of homogeneity indicators with hardness (HRC) revealed their correlation, attributed to changes in local microstructural defects. In all samples, a decrease in homogeneity from the center to the edge was observed, associated with

an increase in defects (e.g., dislocation density and internal stresses) due to differences in cooling rates. For Sample 1, the fractal dimension of pearlite decreased from the edge to the center from 1.55 to 1.51, while for Sample 3, the fractal dimension of martensite decreased from 1.97 at the edge to 1.74 at the center, correlating with an increase in hardness from 36 to 40 HRC for Sample 1 and from 71 to 75 HRC for Sample 3, respectively. It is demonstrated that multifractal analysis of the microstructure surpasses traditional methods of quantitative metallography in sensitivity to substructural changes and the geometric complexity of the microstructure, making it a promising tool for evaluating the physical-mechanical properties of materials.

Key words: Multifractal analysis, Pearlite, Retained austenite, Carbon steel, Hardness, Prediction.

Hlushkova Diana¹, Doct. Sc. (Tech.), Head of the Department of Technology of Metals and Materials Science, ORCID: 0000-0001-8612-6584, e-mail: diana@khadi.kharkov.ua,

Volchuk Volodymyr², Doct. Sc. (Tech.), Head of the Department of Materials Science and Materials Processing, ORCID: 0000-0001-7199-192X, e-mail: volchuk.volodymyr@gmail.com,

Rukavishnikov Yuri¹, Associate Professor of the Department of Construction and Road Machinery, ¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25 Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-A O. Petrova str., Dnipro 49600, Ukraine.