

УДК 669.14.018.23
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.3\(501\).7](https://doi.org/10.15589/znp2025.3(501).7)

A NEW METHOD FOR ANALYZING THE DISPERSION OF HETEROGENEOUS ALLOY STRUCTURES

НОВИЙ МЕТОД АНАЛІЗУ ДИСПЕРСІЇ ГЕТЕРОГЕННИХ СПЛАВІВ

Oleksandr S. Voronov
aleksandr_voronov1998@gmail.com
ORCID: 0009-0009-3384-4152

Oksana Yu. Klochko
klochko.hntysh@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3623-6587

О. С. Воронов,
аспірант

О. Ю. Клочко,
докт. техн. наук, професор

State Biotechnological University, Kharkiv

Державний біотехнологічний університет, м. Харків

Abstract. Purpose. The aim of this study is to develop a novel method for analyzing the dispersion of structural components in heterogeneous alloys such as chromium-nickel and high-chromium cast irons, utilizing advanced digital image analysis techniques. This enhances the accuracy of detecting structural features and improves the understanding of structure formation processes during crystallization and thermal treatment.

Method. The proposed method applies a computer algorithm using hydrodynamic analogies like the Laplace operator, divergence, and power dissipation function. It detects and measures pixel chains of similar color to characterize the distribution and dispersion of phases. This approach enables measuring the lengths of pixel chains of the same conditional color, which correspond to specific phases within the structure. The analysis is performed in both horizontal and vertical directions, and the dispersion calculation is based on the scalar product of these parameters according to the Cauchy–Bunyakovsky inequality. Additionally, normalization of values and image segmentation are applied.

Results. The algorithm revealed that high-chromium cast irons exhibit significant changes in homogeneous phase chain lengths after thermal treatment, unlike chromium-nickel cast irons, which remain stable. This was confirmed through microhardness and dissipation histograms.

Scientific novelty. This is the first known implementation of mathematical hydrodynamics combined with digital metallographic image analysis to quantify internal dispersion states of alloy structures.

Practical importance. The method offers a new tool for structural quality control in metallurgy, enabling optimization of processing techniques to enhance mechanical performance and structural uniformity.

Additionally, the method of analyzing structural dispersion through energy functions can be adapted for studying materials with anisotropic properties, where traditional visualization techniques fail to provide an objective assessment of internal transformations. This approach enables real-time analysis of material degradation processes, which is crucial for critically loaded structural components in mechanical engineering, aviation, and the energy sector.

Key words: dispersion of structure; heterogeneous alloy; energy parameters; metallographic analysis; phase segmentation.

Анотація. Мета. Метою даного дослідження є створення нового підходу до оцінки ступеня дисперсності структури гетерогенних сплавів, зокрема хромонікелевого та високохромистого чавунів, шляхом використання цифрового аналізу металографічних зображень. Це дозволяє підвищити точність виявлення структурних особливостей і покращити розуміння процесів структуроутворення в процесі кристалізації та термічній обробки.

Методика. Запропоновано комп'ютерний алгоритм аналізу зображень, де зміна структурного стану досліджується в кожній точці вибраного фрагменту зображення із застосуванням гідродинамічних аналогій щодо процесів дифузії, а також зміною енергетичного стану, шляхом визначення функції потужності дисипації енергії. Цей підхід дозволяє вимірювати довжини ланцюжків пікселів однакового умовного кольору, які відповідають певним фазам у структурі. Аналіз проводиться в горизонтальному та вертикальному напрямках, а розрахунок дисперсності базується на скалярному добутку вказаних параметрів згідно з нерівністю Коші–Буняковського. Додатково застосовується нормалізація значень та сегментація зображення.

Результати. Метод показав, що після термообробки у високохромистих чавунах суттєво змінюється довжина ланцюжків однорідних фаз, тоді як у хромонікелевих змін майже не спостерігається. Це підтверджується мікротвердістю та гістограмами дисипації.

Наукова новизна. Вперше застосовано поєднання математичних моделей гідродинаміки та цифрового аналізу мікроструктур для кількісної оцінки дисперсності структури сплавів.

Практична значимість. Методика може бути використана для контролю структури у металургії та машинобудуванні, оптимізації термічної обробки та підвищення довговічності матеріалів.

Крім того, методика аналізу структурної дисперсності за допомогою енергетичних функцій може бути адаптована для дослідження матеріалів з анізотропними властивостями, де традиційні методи візуалізації не дозволяють отримати об'єктивну картину внутрішніх змін. Такий підхід відкриває можливості для вивчення процесів деградації матеріалів у реальному часі, що є актуальним для критично навантажених елементів конструкцій у машинобудуванні, авіаційній та енергетичній галузях.

Ключові слова: дисперсність структури; гетерогенний сплав; енергетичні параметри; металографічне зображення; умовні кольори.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У сучасному світі промисловості та науки, в процесі виробництва та створення інноваційних технологій, постійно зростає потреба у дослідженнях щодо впливу технологічних факторів і різних способів обробки матеріалів на рівень споживчих властивостей деталей та виробів. Одним з надважливих завдань таких досліджень є оцінка кількісного і якісного співвідношення та частки структурних фаз в матеріалах.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Для цього використовують різні фізико-хімічні методи досліджень (Transmission electron microscopy (TEM), X-ray fluorescence (XRF), Chemisorption, X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) тощо) у поєднанні з методами комп'ютерного аналізу металографічних зображень.

Відомо [1], що розмір частинок сплаву може суттєво впливати на його структурний стан і механічні властивості. Тому при розробці і використанні нових матеріалів, насамперед з гетерогенною структурою, важливе значення має оцінка їх структури і дисперсного стану фаз. Це дозволить краще зрозуміти та контролювати характеристики досліджуваних матеріалів.

До традиційних найбільш поширених методів оцінки середніх розмірів фазових складових відносяться: TEM і X-ray diffraction. Наприклад, TEM дозволяє представити розподіл частинок фаз також і за розміром. Проте, головним недоліком цих методів є низький рівень чутливості до ультрадисперсних частинок і впливу високоенергетичних електронних пучків. Наприклад, під впливом високоенергетичного електронного пучка при дослідженні TEM, зафіксовано зміни розмірів, форми та структури досліджуваних фаз [2].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

На сьогодні, для проведення кількісного комп'ютерного аналізу мікроструктур, розроблено сучасні програмні комплекси, наприклад, фірм SIAMS, Carl Zeiss, KIPSMAT Pvt. Ltd., відомі публікації про розробку окремих комп'ютерних програм, а також універсальні програми для обробки

зображень, зокрема, Adobe Photoshop і Corel Photo Paint [3; 4]. Розглянуті програми та комплекси використовують підходи для обчислення ступеня дисперсності структури, що полягають у статистичній обробці виявлених кольорів пікселів аналізованого зображення. Вони здатні з різним успіхом визначати параметри структури: об'ємну частку, середній розмір частинок включень, дисперсію, відхилення частинок від круглої форми, коефіцієнт кореляції тощо. Проте, при дослідженні дисперсності структурних складових гетерогенних металевих сплавів, ці підходи не дозволяють, крім різниці в їх геометричних параметрах, також виявити відмінності і всередині кожної з фаз, що мають локальну неоднорідність за концентрацією компонентів.

В раніше опублікованих роботах з дослідження структуроутворення в гетерогенних сплавах [5; 6; 7], нами було проведено оцінювання співвідношення фаз у високолегованих чавунах з використанням математичного аналізу фотографій, отриманих методами оптичної та електронної мікроскопії. Для цього було розроблено підхід, що ґрунтується на комп'ютерному аналізі металографічних зображень для проведення кількісної та якісної оцінки фазового складу досліджуваного сплаву. Методика комп'ютерного дослідження заснована на використанні гідродинамічних аналогій, таких як дивергенція та оператор Лапласу, із застосуванням рівнянь Нав'є-Стокса, що відповідають формуванню фаз при кристалізації сплаву та термічній обробці [8].

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою цієї роботи є розробка нового підходу, що дозволяє визначати дисперсію структури гетерогенного сплаву шляхом визначення довжини ряду пікселів цифрового досліджуваного зображення фаз, розташованих послідовно у вигляді горизонтальних або вертикальних ланцюжків, що складаються з одного й того ж умовного кольору, який описує конкретну структуру досліджуваного сплаву.

З метою перевірки універсальності підходу, були протестовані зображення зразків різного походження, зокрема структури з відмінною морфологією карбідної фази та різною орієнтацією зерен. Це дозволило встановити, що алгоритм стабільно працює за умов

високої неоднорідності зображення та різної якості контрасту, що підтверджує його адаптивність до широкого спектру металографічних даних.

Для забезпечення об'єктивності обробки, вхідні зображення стандартизувалися за яскравістю та масштабом пікселів, а також було проведено автоматичну нормалізацію гістограм. Такий підхід уможливив мінімізацію впливу суб'єктивних чинників, які зазвичай виникають під час візуальної оцінки мікроструктури.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

На основі статистичних досліджень за отриманими даними будували гістограми по довжині виявлених часток різних досліджуваних фаз. Це дозволило провести більш повний аналіз їх розподілу з відмінними за формою, розмірами і хімічним складом. Для побудови гістограм для певної фази програма сканує зображення, як в горизонтальному, так і у вертикальному напрямках в заданій області. При цьому, проводиться лінійний пошук ланцюжків пікселів, що потрапляють в заданий інтервал умовних кольорів для кожної з фаз. Сканування зображення проводиться велику кількість разів (порядку декількох сотень) на одному знімку.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Алгоритм розрахунку довжини таких ланцюжків пікселів полягає в наступному. При кожному скануванні в горизонтальному або вертикальному напрямку розглядаються три, наступні один за одним, пікселя (для скорочення названі номером 1, 2 і 3). При виконанні програми цифрову фотографію задавали прямокутною матрицею з елементами c_{ij} (значення кольорів від 0 до 255), де індекс i – відноситься до номера рядка, а індекс j – до номеру стовпчика. При скануванні горизонталлю змінювався номер стовпчика, тобто, точці 1 відповідав стовпець з номером $j - 1$, точці 2 – стовпець з номером j , точці 3 – стовпець з номером $j + 1$ при одному і тому ж номері рядка i . Аналогічно, при скануванні вертикаллю точці 1 відповідав рядок із номером $i - 1$, точці 2 – рядок з номером i , точці 3 – рядок з номером $i + 1$ при одному і тому ж номері стовпця j .

В алгоритмі виконували умови, за якими при аналізі структури в точках 1, 2, 3 отримували наступні 4 випадки:

- якщо властивості фази в точці 1 не збігаються з властивостями в точці 2, але для точки 2 збігаються з точкою 3, то це означає, що розгляд і розрахунок попереднього ланцюжка закінчився, і з'являється – новий, причому, його довжина відразу починається з двох точок;
- властивості точки 1 збігаються з 2 і 3. У цьому випадку до довжини ланцюжка додається одиниця;
- якщо ж властивість фази в точці 1 не збігається з 2 і також 2 не збігається з точкою 3, то в цьому

випадку довжина ланцюжка дорівнює одиниці, і він розглядається як ізольована точка. До гістограми довжин ланцюжків додається 1 в точці, що відповідає довжині ланцюжка, що дорівнює одиниці;

– в разі, коли властивості фази точки 1 збігаються з 2, але властивості останньої не збігаються з 3. Це означає, що розгляд і розрахунок цього ланцюжка закінчився.

При виконанні алгоритму ланцюжок закінчувався з завершенням рядка при горизонтальному скануванні, або із закінченням стовбця – при вертикальному. До гістограми довжин ланцюжків додається 1 в точці, що відповідає накопиченій довжині ланцюжка. Описаний алгоритм дозволяє отримати гістограму розподілу довжин ланцюжків, а також їх середні довжини. При цьому розрахунок умовного кольору проводили математичною обробкою металографічного зображення за розробленою методикою, вводили параметри, що описують потужність дисипації (розсіювання) енергії в процесі структуроутворення.

Відомо, що лапласіан, або вихор, в гідродинамічній аналогії, – це сума частинних похідних другого порядку по осях x та y . Аналогічно, дивергенція, сума частинних похідних першого порядку по осях x та y [8]. В роботі [7] було запропоновано при дослідженні фотографій мікроструктур сплавів виражати через ці поняття дисипацію енергії, що характеризує дифузний процес, і зміну щільності фрагментів. Виходячи з фізичних розмірностей розглянутих параметрів, припустимо, що лапласіан відображає відношення чинної сили до маси, а дивергенція відповідає швидкості [8]. В цьому випадку добуток лапласіана на одиничну масу і дивергенцію (за розмірністю) визначає потужність. Оскільки через оператор Лапласа задається функція, що визначає дисипацію енергії, то добуток лапласіана на дивергенцію можна трактувати як функцію потужності дисипації енергії. Сума таких добутків є скалярним добутком. Виходячи з цього, довжину ланцюжка пікселів запропоновано розраховувати відповідно до нерівності Коші–Буняковського [9], де нормами для скалярного добутку є L – лапласіан і D – дивергенція. Відповідно норми і нерівність приймають вид:

$$\|L\| = \sqrt{\sum_{k=1}^m L_k^2}, \quad (1)$$

$$\|D\| = \sqrt{\sum_{k=1}^m D_k^2}, \quad (2)$$

$$(L, D) = \left| \sum_{k=q}^m L_k D_k \right| \leq \|L\| \cdot \|D\| = \left(\sqrt{\sum_{k=1}^m L_k^2} \right) \cdot \left(\sqrt{\sum_{k=1}^m D_k^2} \right), \quad (3)$$

де m – змінне число для всієї фотографії, що показує довжину ланцюжка.

В даному дослідженні в якості міри дисперсності запропоновано розглядати відношення, що виражає

нормоване значення потужності дисипації енергії, яке в силу нерівності (3) змінюється від 0 до 1:

$$b_u = \frac{(L, D)}{\|L\| \|D\|}. \quad (4)$$

Виходячи з отриманих статистичних даних при аналізі фотографій, використовували алгоритм розрахунку норм і скалярних добутків по довжині ланцюжка, де шукані параметри розраховували відповідно до (1)–(4). Наприклад, при горизонтальному скануванні, уздовж осі x , обчислення лапласіану (5), дивергенції (6) і потужності дисипації енергії (7), виконували за такими формулами:

$$L_{i,j} = c_{i,j-1} + c_{i,j+1} + c_{i-1,j} + c_{i+1,j} - 4c_{i,j}; \quad (5)$$

$$D_{i,j} = c_{i,j-1} + c_{i-1,j} - 2c_{i,j}; \quad (6)$$

$$M_{i,j} = L_{i,j} D_{i,j}. \quad (7)$$

Згідно застосованому алгоритму, параметр дисперсності, розрахований відповідно до (4), визначали наступним чином:

$$\text{при } M_{i,j} \begin{cases} < 0, \text{ то } u_{i,j} = -1, \\ = 0, \text{ то } u_{i,j} = 0, \\ > 0, \text{ то } u_{i,j} = 1, \end{cases} \quad (8)$$

де $u_{i,j}$ – дискретний параметр, що виражає нормоване значення функції потужності дисипації енергії, що відповідає дисперсності структури.

Відповідно (8), отримані параметри, що визначають дисперсність структури за допомогою енергетичної функції, мають різні знаки або нейтральні (рівні 0). Це дає можливість оцінювати ступінь неоднорідності досліджуваної структури з точки зору таких процесів, як, наприклад, дифузія, деформація, які протікають на різних етапах виготовлення, обробки і експлуатації виробу.

Відповідно до формул (1)–(3), а також виходячи з того, що заздалегідь невідомо число доданків m , основу розрахунку становить накопичення сум квадратів лапласіану і дивергенції, а також добутку лапласіана на дивергенцію. Причому, для пункту 1 алгоритму побудови ланцюжка пікселів накопичення проводиться по першій і другій точці, а для пунктів 2 і 3 – тільки по другій. При цьому, накопичення проводиться окремо для кожного випадку, при якому $u_{i,j} = -1$, $u_{i,j} = 0$ і $u_{i,j} = 1$. При застосуванні даного алгоритму для оцінки неоднорідності структури, розрахункові норм виробляли не тільки для всієї фотографії, але ще і для 6 виділених смуг в області зображення, що мають певну спрямованість при горизонтальному і вертикальному скануванні.

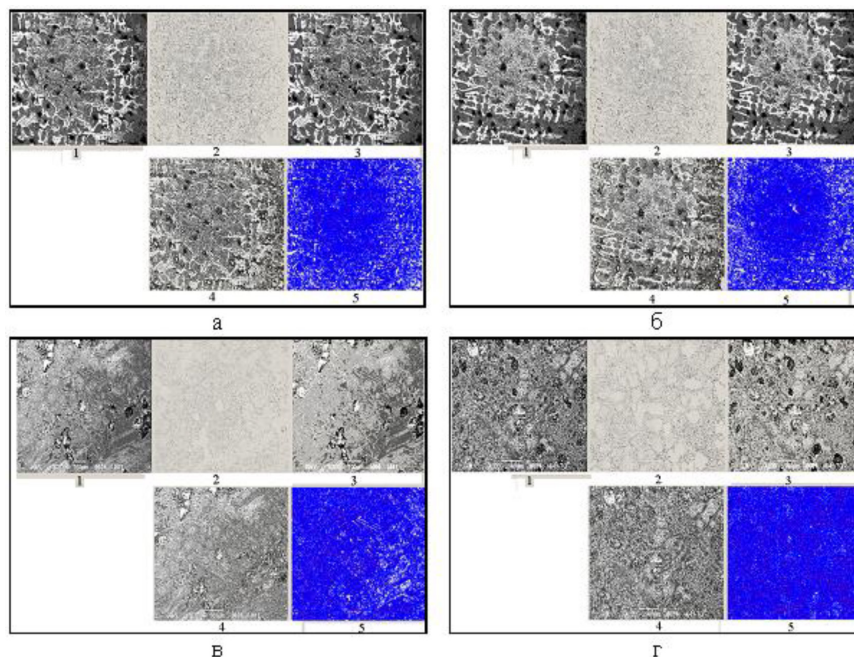


Рис. 1. Алгебраїчні гістограми функції потужності дисипації енергії для хромопелієвого і високохромистого чавунів у литому стані і після термічної обробки (циклічних низькотемпературних відпалів з нагріванням в область магнітного перетворення карбідних фаз до температур: 190 °C і 220 °C, а також 350 °C і 450–500 °C відповідно):

а, б – хромопелієвий чавун; *в, г* – високохромистий чавун; *а, в* – в литому стані; *б, г* – після термообробки; де 1 – вихідні фотографії мікроструктур; 2–5 – гістограми функції потужності дисипації: 2 – з негативним знаком; 3 – нейтральні по знаку (рівноважний стан, відсутність дисипації); 4 – з позитивним знаком; 5 – поєднане зображення (пропуск кольору відповідає рівноважному стану з відсутністю дисипації енергії)

Для апробації запропонованого алгоритму виконана оцінка дисперсності структури, побудовані гістограми функції потужності дисипації енергії (рис. 1) для хромонікелевого (мас.%, 2,94C; 1,30Si; 0,62Mn; 0,34Cr; 2,90Ni; 0,28Mo; 0,13Cu) і високохромистого (мас.%, 2,76C; 0,99Si; 0,86Mn; 16,40Cr; 1,38Ni; 1,24Mo; 0,31Cu; 0,27V; 0,035Mg) чавунів, використовуваних для валків чистової групи клітей листопрокатних станів, що відливаються відцентровим методом (в литому стані і після термічної обробки – відпалу).

При аналізі цих структур встановлено, що отримана довжина ланцюжків одного кольору в хромонікелевих чавунах значно більше, ніж в високохромистих. Причому проведена термообробка додатково значніше впливає на зменшення їх довжини в високохромистих чавунах. Зменшення при відпалі довжини безперервних ланцюжків однорідних фаз вносить, крім інших факторів, істотний внесок у зміну мікротвердості матриці чавуну. В литому стані становить: в перліті хромонікелевого чавуну – $H_{50}221-260$; в високохромистому – продукти розпаду аустеніту – $H_{50}362-437$.

Після відпалу: в хромонікелевому чавуні – $H_{50}238-277$; в високохромистому – $H_{50}333-392$. Отже, збільшення ступеня дисперсності структури в високохромистих чавунах, в результаті термічної обробки, помітно змінюється, що було показано в роботах [3, 200].

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Отримані гістограми показують значний вплив термічної обробки на зміну знаку функції потужності дисипації енергії високохромистих чавунів - різко збільшується кількість параметрів з позитивним знаком за рахунок зменшення нейтральних значень. У хромонікелевих чавунах в середньому переважає нейтральна функція потужності дисипації енергії. Отже, в порівнянні з високохромистим чавуном, в хромонікелевому сплаві в процесі кристалізації відбулися найбільш повні структурні зміни, що сприяють утворенню рівноважного енергетичного стану структури, і тому, термічна обробка для високохромистих чавунів є більш ефективною, з точки зору розпаду залишкового аустеніту. Термічна обробка при $t = 190\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ в хромонікелевих чавунах не приводить до істотної зміни знаку цієї функції, що відповідає вищевикладеному аналізу довжини ланцюжків пікселів одного кольору.

Додатково, аналіз отриманих гістограм дозволяє зробити припущення щодо характеру структурної трансформації, яка відбувається під час термічної обробки. Зокрема, збільшення кількості позитивних значень функції потужності дисипації може свідчити не лише про розпад залишкового аустеніту, але й про можливе переформування внутрішніх меж фаз, що відображає підвищення локальної щільності

енергетичних зв'язків між структурними елементами. Це узгоджується з фізико-хімічними механізмами стабілізації структури при відпалі.

Ще одним важливим моментом є різний рівень чутливості до термообробки хромонікелевих і високохромистих чавунів. Така поведінка може бути пов'язана із природою легуючих елементів, які вносять вклад у термодинамічну стабільність фаз. Наприклад, присутність нікелю сприяє утворенню стабільного аустеніту, тоді як високий вміст хрому стимулює формування карбідних фаз із підвищеною енергією меж зерен. Це створює передумови для більш глибоких змін структури під час відпалу.

Отримані результати також свідчать про потенціал методики виявляти латентні зміни в мікроструктурі, які важко зафіксувати традиційними візуальними методами. У разі хромонікелевих чавунів, хоча візуально мікроструктура не демонструє значних змін після відпалу, показники мікротвердості та енергетичної дисипації засвідчують приховану активність внутрішніх фазових перетворень. Це підкреслює чутливість методу до дрібномасштабних змін, які можуть істотно впливати на експлуатаційні властивості матеріалу.

Крім того, аналіз дисипації дозволяє побічно оцінити рівень залишкових напружень у структурі. Це може мати практичне значення для прогнозування тріщиноутворення або зниження ресурсу матеріалу при циклічних навантаженнях. Розширення методики шляхом поєднання з іншими видами даних – наприклад, рентгенівською дефрактометрією або електронною мікроскопією – може значно поглибити якісну та кількісну інтерпретацію отриманих результатів.

Також варто зауважити, що метод цифрового аналізу зображень, запропонований у даному дослідженні, може мати потенціал для адаптації до інших типів сплавів, зокрема кольорових металів, а також для оцінки структури після різних видів обробки – наприклад, механічної деформації або впливу агресивного середовища. Подальші дослідження в цьому напрямку можуть стати підґрунтям для розробки універсальної системи оцінки ступеня дисперсності зображень у матеріалознавстві.

ВИСНОВКИ

Отримані у роботі результати свідчать, що питання зміни знаку функції потужності дисипації енергії представляє науковий і практичний інтерес з погляду поведінки різних матеріалів під час їх виробництва та експлуатації. Попередні дослідження показали, що більшість гетерогенних структур мають позитивний або нейтральний знак функції потужності дисипації, тоді як негативний знак спостерігається у ізованих структурах.

Вираз дисперсності за допомогою функцій, що представляють енергетичні параметри, дозволяє задавати значну кількість ознак, що описують різні характеристики структури аналізу металографічних зображень.

REFERENCES

- [1] Belyakov, A. (2019). Microstructure and mechanical properties of structural metals and alloys. *Metals*. <https://doi.org/10.3390/books978-3-03897-506-9>
- [2] Li, W., Ma, R., Chen, D., et al. (2021). The effect of continuous electron beam scanning process on the microstructure and geometry of U-5.5 wt%Nb alloy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 496, 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.03.019>
- [3] Voronov, O. S., & Klochko, O. Yu. (2023). Prohramy dlia doslidzhennia struktury metalevykh splaviv [Programs for studying the structure of metal alloys]. In *Materialy Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Novi i netradytsiini tekhnologii v resursozbezheni"* (6–7 hrudnia 2023 r.) (pp. 53–54). Odesa. [in Ukrainian]
- [4] Szczotok, A., & Karpisz, D. (2019). Application of two non-commercial programs to image processing and extraction of selected features occurring in material microstructure. In *Proceedings of METAL 2019: 28th International Conference on Metallurgy and Materials* (pp. 1721–1725). TANGER Ltd.
- [5] Skoblo, T. S., Klochko, O. Yu., & Belkin, E. L. (2012). Struktura vysokokhromystoho chavunu [Structure of high-chromium cast iron]. *Stal u perekladi – Steel in Translation*, 42(3), 261–268. <https://doi.org/10.3103/S0967091212030151> [in Ukrainian].
- [6] Skoblo, T. S., Klochko, O. Yu., Belkin, E. L., et al. (2017). Rozrobka novykh pidkhodiv do otsinky formuvannia struktury u vysokokhromystomu chavuni [Development of new approaches to estimation of structure formation in high-chromium cast iron]. *Industriialna laboratoriia. Diahnostyka materialiv – Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 83(5), 27–38. [in Ukrainian].
- [7] Klochko, O. Yu., & Voronov, O. S. (2022). Doslidzhennia formuvannia struktury vysokolehovanykh khromystykh splaviv z vykorystanniam kompiuternoho analizu [Study of structure formation of high-chromium alloys with computer analysis]. In *Materialy Mizhnarodnoi naukovo konferentsii «Informatsiini tekhnologii ta menedzhment u vyshchii osviti ta nautsi»* (pp. 42–46). Riga : Baltija Publishing. [in Ukrainian].
- [8] Polyanin, A., & Manzhirrov, A. (2006). *Dovidnyk z matematyky dlia inzheneriv i vchenykh [Handbook of mathematics for engineers and scientists]*. Chapman & Hall.
- [9] Skoblo, T. S., Belkin, E. L., & Klochko, O. Yu. (2011). Obgruntuvannia zastosuvannia poniat rivnian hidrodynamiky Nav'ie-Stoksa dlia analizu metalohrafichnykh zobrazhen [Justification of applying Navier–Stokes hydrodynamic equations for metallographic image analysis]. In *Materialy VII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Yevropeiska nauka XXI stolittia – 2011"*, Vol. 21. *Tekhnichni nauky* (pp. 94–96). Peremysl : Nauka i Studii. [in Ukrainian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Беляков, А. (2019). Microstructure and mechanical properties of structural metals and alloys. *Metals*. <https://doi.org/10.3390/books978-3-03897-506-9>
- [2] Li, W., Ma, R., Chen, D., та ін. (2021). The effect of continuous electron beam scanning process on the microstructure and geometry of U-5.5 wt%Nb alloy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 496, 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.03.019>
- [3] Воронов, О. С., Ключко, О. Ю. (2023). Програми для дослідження структури металевих сплавів. У *Матеріалах Міжнародної науково-технічної конференції «Нові і нетрадиційні технології в ресурсозбереженні» (6–7 грудня 2023 р.)* (С. 53–54). Одеса.
- [4] Szczotok, A., Karpisz, D. (2019). Application of two non-commercial programs to image processing and extraction of selected features occurring in material microstructure. У *Proceedings of METAL 2019: 28th International Conference on Metallurgy and Materials* (С. 1721–1725). TANGER Ltd.
- [5] Скобло, Т. С., Ключко, О. Ю., Белкін, Є. Л. (2012). Структура високохромистого чавуну. *Сталь у перекладі*, 42(3), 261–268. <https://doi.org/10.3103/S0967091212030151>
- [6] Скобло, Т. С., Ключко, О. Ю., Белкін, Є. Л. та ін. (2017). Розробка нових підходів до оцінки формування структури у високохромистому чавуні. *Індустріальна лабораторія. Діагностика матеріалів*, 83(5), 27–38.
- [7] Ключко, О. Ю., Воронов, О. С. (2022). Дослідження формування структури високолегованих хромистих сплавів з використанням комп'ютерного аналізу. У *Матеріали Міжнародної наукової конференції 'Інформаційні технології та менеджмент у вищій освіті та науці'* (С. 42–46). Riga : Baltija Publishing.
- [8] Полянін, А., Манжиров, А. (2006). *Довідник з математики для інженерів і вчених*. Chapman & Hall.
- [9] Скобло, Т. С., Белкін, Є. Л., Ключко, О. Ю. (2011). Обґрунтування застосування понять рівнянь гідродинаміки Нав'є-Стокса для аналізу металографічних зображень. У *Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Європейська наука XXI століття – 2011»*, Т.21. *Технічні науки* (С. 94–96). Перемишль: Наука і студії.

© Воронов О. С., Ключко О. Ю.

Дата надходження статті до редакції: 14.08.2025

Дата затвердження статті до друку: 25.08.2025

Опубліковано: 24.11.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0