

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-277-7-104>

**STUDY OF STRUCTURE FORMATION OF HIGH CHROMIUM
ALLOYS WITH COMPUTER ANALYSIS**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРНОГО
АНАЛІЗУ ОСОБЛИВОСТЕЙ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ
ВИСОКОХРОМИСТИХ СПЛАВІВ**

Klochko O. Yu.

*Doctor of Engineering, Professor,
Professor at the Department of Service
Engineering and Materials Technology
in Mechanical Engineering
State Biotechnology University
Kharkiv, Ukraine*

Клочко О. Ю.

*доктор технічних наук, професор,
професор кафедри сервісної
інженерії та технології
матеріалів в машинобудуванні
Державний біотехнологічний
університет
м. Харків, Україна*

Voronov O. S.

*Ph.D. Student at the Department
of Service Engineering and Materials
Technology in Mechanical Engineering
State Biotechnology University
Kharkiv, Ukraine*

Воронов О. С.

*аспірант кафедри сервісної
інженерії та технології
матеріалів в машинобудуванні
Державний біотехнологічний
університет
м. Харків, Україна*

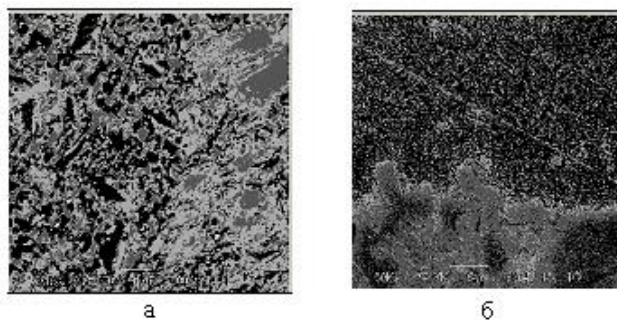
Істотним недоліком високохромистих чавунів є нестабільність їх властивостей у період експлуатації через наявність залишкового аустеніту. В складних умовах експлуатації (термоциклічний вплив, високі питомі тиски) розпад цієї фази супроводжується зростанням напружень, утворенням тріщин, тощо. Зменшити частку залишкового аустеніту в таких сплавах можливо додатковим легуванням для утворення спеціальних карбідів, а також термічною обробкою [1]. Оскільки залишковий аустеніт, як правило, розташовується в локальних зонах, то при розпаді звичайним мікроструктурним аналізом важко не тільки визначити тип продуктів розпаду, але і їх кількість. Виходячи з цього, метою досліджень було використання нових підходів і методів оцінки структури за допомогою комп'ютерного аналізу металографічного зображення.

Дослідження проводили на зразках, відібраних від робочого шару (2.74%С; 16.4%Cr) масивних двошарових виливків. Максимальний розпад залишкового аустеніту здійснювали низькотемпературним

циклічним відпалом в інтервалі магнітного перетворення карбідних фаз 200-500°C [2]. Структуроутворення оцінювали методом оптико-структурного комп'ютерного дослідження металографічного зображення [3], заснованого на положеннях гідродинаміки, де кожній координаті пікселя задавали значення умовного кольору, який розраховували через абсолютні значення лапласіану (неоднорідність) або дивергенції (щільність фрагменту). Було аналізовано зображення різних фрагментів досліджуваних структур у литому стані і після термічної обробки. Для оцінки використовували фотографії у цифровому форматі .pgm, що включає 256 відтінків сірого кольору: від 0 до 255. Для структури даного чавуну визначено кольори: 0; 8; 9; 73; 82; 92; 155; 164; 246; 237; 255, яким присвоєно порядкові номери від 1 до 11. Виявлені умовні кольори утворюють три групи: 1 – 6 – карбіди; 7 – аустеніт; 8 – 11 – ферит.

Установлені залежності неоднородності розподілення фаз в структурі високохромистого чугуна, с помощью анализа сочетаний виявлених умовних кольорів на фрагментах зображень досліджуваних структур. В роботі розглянуто розподілення сочетаний, виявлених 11 умовних кольорів для 24 пікселів вкруг середнього с координатами s_{ij} на площині зображення.

Отримано поєднання кольорів (далі фаз) між фотографіями аналізованих структур у литому стані та після термообробки. За допомогою перебору 3-х поєднань аналізували коефіцієнт кореляції (R_{mn}) між вмістом фаз (рис. 1). Де чорний – перший колір поєднання (карбідні фази: від 1 до 5), темно сірий – другий (цементит та аустеніт: від 6 до 7), білий – третій (ферит: від 8 до 11). Фон зображення – світло сірий, означає відсутність поєднання кольорів.



**Рис. 1. Розподіл ($N_{\phi}=1$) поєднання фаз (при $R_{mn} > 0.7$):
а) в литому стані; б) після відпалу**

Число поєднань фаз помітно зменшується після термообробки, що характеризує зміну фазового складу та зменшення неоднорідності структури при розпаді залишкового аустеніту. На підставі виявлених поєднань побудовано математичну модель залежності між умовними кольорами пікселів зображення в литому стані і після термообробки, що відображає взаємодію між фазами досліджуваного сплаву. Визначено коефіцієнти множинної кореляції (R_{mn}) та значущість для кожного фактора математичної моделі (табл. 1).

Таблиця 1

**Значущість умовних кольорів у кореляційних моделях
для зображень досліджуваних структур**

Значущість	Номер умовного кольору											R_{mn}	N_{ϕ}^*
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
	Карбідні фази						Аус-те-ніт	Ферит					
	1.0	6.12	0.0	0.0	0.0	0.0	1.45	0.0	4.15	5.36	0.0	0.98	1
	1.01	6.30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.68	5.56	2.39	0.98	2

N_{ϕ}^* – номер фотографії аустенітного зерна, що розпалося, біля границі: 1 – литий стан; 2 – після відпалу

У литому стані значущими факторами є карбіди кольорів 1 і 2, аустеніт, а також ферит (кольори 9 та 10). Після відпалу спостерігається збільшення значущості фаз із кольором: 2, 9 і 10. Вплив аустеніту відсутній, що пов'язано з його повним розпадом після термообробки. Після розпаду аустеніту значущим є колір 11. Встановлено тісний кореляційний зв'язок між кольорами у побудованій математичній моделі. Визначено, що структура високохромистого чавуну включає фази, сформовані на різних етапах отримання виробу в процесі кристалізації та термообробці, що відрізняються своїм хімічним складом.

Аналіз зміни залежності умовних кольорів, що описують фази сплаву в литому стані та після термічної обробки, з повним розпадом залишкового аустеніту, показав, що між фрагментами спостерігається значна зміна в кількісному складі фаз. Після відпалу зменшується на: 15.6% кількість залишкового аустеніту; 1% і 3.5% карбідів кольорів 5 та 6 відповідно. Одночасно збільшується кількість карбідних фаз

кольорів 1, 2, 3 та 4 на 0.6%, 6.1%, 2.4% та 2% відповідно; а також кількість феритної фази: 8, 9, 10 та 11 на 0.4%, 3.6%, 4.9% та 0.1% відповідно. Це свідчить про наявність фериту (колір 8-11), аустеніту (колір 7) і карбідів (колір 1-6), що відрізняються за хімічним складом (C, Cr).

Припустивши, що справжня дивергенція пропорційна оптичній, кількісно локальну неоднорідність структури розраховували, обчислюючи дивергенцію (що характеризує щільність розподілу умовного кольору зображення структури). Нерівність нулю дивергенції відповідає ущільненню (збільшенню) кількості пікселів виявленого кольору. У скінчено-різницевому вигляді аналог дивергенції (D_{kl}) та величина, що характеризує ущільнення фрагмента (P_{kl}) для двовимірного випадку при обробці зображень в такому випадку мають вираження відповідно [4]:

$$D_{kl} = \frac{\sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{n-1} (c_{klij-1} - c_{klij} + c_{kli-1j} - c_{klij})}{(m-1)(n-1)} \quad \text{та} \quad P_{kl} = \frac{D_{kl}}{|D_{kl}|},$$

де індекси k, l відносяться до номера рядка та стовпця фрагмента, індекси i, j – до номера рядка та стовпця всередині самого фрагмента зображення.

Колір від 0 до 255 позначений у цій формулі літерою c та відповідним індексом. За даними формулами розраховано та виведено на екран щільності розподілу умовного кольору в литому стані та після термообробки. Встановлено, що щільність розподілу умовного кольору після термообробки істотно менша, ніж щільність у литому стані. З отриманого результату випливає однозначний висновок про зменшення числа фаз за рахунок розпаду залишкового аустеніту та збільшення дисперсності продуктів перетворення, а також зменшення неоднорідності структури внаслідок проведеної дестабілізуючої термічної обробки.

За допомогою розробленого алгоритму комп'ютерного аналізу, розраховано та побудовано розподіл поєднань виявлених фаз (умовних кольорів) на фрагментах металографічних зображень досліджуваних структур високохромистого чавуну, котрі виявляють неоднорідність розподілу фаз з хімічним складом, що відрізняється. Це дозволило виявити поєднання таких фаз в литому стані та після термообробки. Такий спосіб може бути використаний для ідентифікації фаз, що виділяються при дисперсійному твердінні легованих сплавів. Автори

планують продовжити дослідження з метою модифікації цього алгоритму різного практичного застосування.

Розраховані та побудовані розподіли щільності умовних кольорів, що дозволяє оцінити кількісне співвідношення фаз у досліджуваній структурі. На основі отриманих результатів встановлено істотне зменшення щільності розподілу умовних кольорів після термообробки в порівнянні з литим станом. Це однозначно підтверджує зменшення числа фаз та збільшення дисперсності досліджуваної структури в результаті проведення низькотемпературного циклічного відпалу, що супроводжується розпадом залишкового аустеніту.

Література:

1. Производство и применение прокатных валков. *Довідник* / під ред. проф. Скобло Т. С. Харків : ЦД № 1. 2013. 572 с.
2. Skoblo T. S., Klochko O. Yu., Sidashenko A. I., Sokolov R. G. Heat treatment of two-layer alloyed-iron rollers. *Steel in Translation*. 2013. 43(9). 603–606.
3. Skoblo T. S., Klochko O. Yu., Sidashenko O. I., Belkin E. L. Theoretical and experimental framework for prediction of structure formation and high-carbon doped alloys properties. *Monograph* ed. prof. T. S. Skoblo. Kh. : Disa plus. 2019. 278 p.
4. Skoblo T. S., Klochko O. Y., Belkin E. L., Sidashenko O. I. New approaches in the study of inhomogeneity of heterogeneous structures. *Metallophysics and the advanced technologies*. 2018. 40(2). 255–280.