УДК 004.932.2:620.186

АВТОМАТИЗОВАНИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ РОЗМІРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МІКРОСТРУКТУРНИХ СКЛАДНИКІВ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ TiC–VC–НАНО WC

І. В. КОВАЛЬ [1], *Ю. В. ОБУХ* [2], *Л. Г. БОДРОВА* [1], *Б. П. РУСИН* [2], *Г. М. КРАМАР* [1], *С. Ю. МАРИНЕНКО* [1]

[1] *Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя;*

[2] *Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів*

Розроблено автоматизований метод оцінювання параметрів кільцевої мікроструктури твердих сплавів TiC–VC–наноWC–NiCr. Програмний пакет написаний на мові C++ стандарту 98 з використанням парадигм кросплатформового програмування. Для визначення об'ємного вмісту основних структурних компонентів сплавів та розмірних характеристик карбідних зерен використано основні положення стереометричної металографії.

Ключові слова: *цифрова обробка зображень, тверді сплави, карбідні зерна, параметри мікроструктури.*

Вольфрамокобальтові тверді сплави на деяких стадіях металообробки можна замінити сплавами на основі карбіду титану. Для таких сплавів, легованих іншими карбідами, характерна кільцева мікроструктура (ядро–периферійний шар) карбідних зерен. Під час різання периферійні шари карбідів взаємодіють з оброблюваною поверхнею і визначають зносо- і термотривкість інструменту. Легувальні порошки карбідів нанорозмірів як вихідні компоненти сплавів сприяють утворенню багатофазової високодисперсної структури з поліпшеними експлуатаційними властивостями [1, 2].

Існує низка пакетів прикладних програм для кількісного металографічного аналізу мікроструктур. Зокрема, пакети DF-PSI, SPEKTR MET 5.6, Intron-Set, IMAGE-SP тощо дають можливість визначити кількісні характеристики мікроструктурних складників матеріалів, виконати статистичний аналіз їх розподілу, сформувати атласи цифрових зображень і протоколи досліджень [3]. Вони придатні для одно- і двофазних структур, рівновісних і нерівновісних зерен, для встановлення регламентованих характеристик мікроструктурних компонентів та побудови гістограм розподілу розмірів зерен. Проте на практиці не дають змоги з необхідною точністю та достовірністю автоматизувати процес оцінки параметрів багатофазних високодисперсних мікроструктур.

Для вольфрамокобальтових твердих сплавів основними кількісними характеристиками мікроструктури, які визначають згідно зі стандартами, в т.ч. ISO, є середній розмір карбідів $\overline{d}_{\mathrm{WC}}$, коефіцієнт їх суміжності C, товщина кобальтових прошарків $\overline{l}_{\mathrm{Co}}$, питомі площі міжзеренної $S_{\mathrm{WC–WC}}$ та міжфазової $S_{\mathrm{WC–Co}}$ поверхонь [4]. Параметри структури для без- і маловольфрамових твердих сплавів стандарти не регламентують. Щоб створити нові тверді сплави, проаналізувати вплив фазово-структурних характеристик на їх властивості, необхідно вдосконалити методи комп'ютерного аналізу їхніх металографічних зображень [5–8].

Контактна особа: Ю. ОБУХ, e-mail: Bleach@ipm.lviv.ua

Мета цього дослідження – розробити автоматизований метод аналізу розмірних характеристик мікроструктурних складників твердих сплавів на основі TiC–VC–нано WC з NiCr зв'язкою.

Матеріали та методи. Аналізували зображення мікроструктури спечених сплавів системи TiC–5VC–5 нано WC–18NiCr на основі карбіду титану, легованих карбідом ванадію та нанорозмірними частинками карбіду вольфраму з нікельхромовою зв'язкою, отримані за допомогою растрового електронного мікроскопа ZEISS EVO 40XVP за 2000- і 5000-кратних збільшень. Визначали основні стереометричні її параметри $\bar{d}_{c\,\mathrm{TiC}}$ та $\bar{d}_{\mathrm{TiC}}$, які впливають на середній розмір ядер карбідних зерен (темна γ-фаза). Враховуючи те, що міцність і зносотривкість твердих сплавів залежать від відсоткового вмісту дрібних зерен, карбідної неоднорідності структури, кількості зерен кільцевої форми, визначали об'ємну частку основних їх фаз $V_{c\,\mathrm{TiC}}$, V_{TiC}, V_{NiCr}, дисперсію D та коефіцієнт варіації розмірів карбідних зерен V.

Оцінювали параметри мікроструктури та розраховували об'ємні частки фазових складників планіметричним методом, який враховує розміри усіх найдрібніших частинок, що потрапляють в поле зору мікроскопа, і дає можливість визначити сумарну площу, зайняту кожною з фаз на загальній площі зображення.

Результати досліджень. Робоча формула встановлює зв'язок між частками площі і об'єму та є однією із фундаментальних співвідношень у стереології [9]:

$$Ps = S/L^2 = V/L^3 = Pv, \tag{1}$$

де S і V – площа і об'єм, зайняті відповідним структурним складником у кубічному елементі зразка з ребром L.

Об'ємні частки карбідних зерен визначали так. На мікрофотографії окреслювали контури, зайняті всіма карбідними зернами (в т. ч. гомогенними та з кільцевою структурою) і ядрами, та визначали їх площі:

$$S_{\mathrm{TiC}} = S_1 + S_2 + \ldots + S_n, \tag{2}$$

$$S_{c\,\mathrm{TiC}} = S_{c1} + S_{c2} + \ldots + S_{ck}. \tag{3}$$

На кожному цифровому зображенні площею $S = L_1 \times L_2$ знаходили відповідно об'ємні частки карбідних зерен, ядер та зв'язки:

$$V_{\mathrm{TiC}} = S_{\mathrm{TiC}}/S, \tag{4}$$

$$V_{c\,\mathrm{TiC}} = S_{c\,\mathrm{TiC}}/S, \tag{5}$$

$$V_{\mathrm{NiCr}} = 1 - V_{\mathrm{TiC}}. \tag{6}$$

Середнє квадратичне відхилення і дисперсію розмірів карбідних зерен обчислювали за формулами математичної статистики. Коефіцієнт варіації розмірів карбідів

$$V = \sqrt{D}/\bar{d}_{\mathrm{TiC}}\,. \tag{7}$$

Для кількісного визначення характеристик (4)–(6) та середніх розмірів карбідних зерен і їх ядер розробили програмне забезпечення. Оскільки програмний пакет написаний на мові C++ стандарту 98 з використанням парадигм кросплатформового програмування, то може працювати на платформах Windows, Linux, MacOS та Android. Крім того, тут забезпечена підтримка вбудованих пристроїв збору даних – цифрових сигналів, зображень та потокового відео (мікроскопи, камери тощо).

Для оброблення зображень використовували різні алгоритми бінаризації, поліпшення контрасту, сегментації, морфологічної фільтрації, виділення меж, а також визначення геометричних параметрів об'єктів аналізу. Обробляти та аналізувати зображення можна в інтерактивному режимі з залученням фахівців-мате-

ріалознавців. Частина алгоритмів працює в автоматичному режимі. Наприклад, для сегментації зображень можна вжити автоматичний режим, який ґрунтується на методах оптимізації функції вартостей, що описує відповідність пікселів на зображенні тому чи іншому об'єкту. Кількість об'єктів задає фахівець як апріорні дані. Класифікують їх автоматично, використовуючи методи кластерного аналізу.

Залежно від якості вхідного зображення фахівець може застосувати комбінації поданих алгоритмів його поліпшення, щоб одержати найкращий результат. Наприклад, під час обробки зображень, отриманих на електронному мікроскопі, можна спостерігати злиття об'єктів аналізу – зерен карбідів. Тоді після попереднього етапу оброблення зображення сегментують. Далі, щоб усунути злиття окремих зерен, оператор застосовує морфологічну фільтрацію. Незначне погіршення якості зображення, зокрема його країв, несуттєве, оскільки не впливає на загальний розподіл площі об'єктів. Вхідні зображення з приблизно однаковими параметрами зйомки можна обробляти не поодинці, а відразу пакетом, що суттєво економить час. Інтерфейс програми містить різні інструменти для роботи з зображеннями, які поліпшують ергономічність розв'язку поставленої задачі.

За розробленим автоматизованим методом пропонуємо таку процедуру виділення карбідних зерен і їх ядер (рис. 1): вихідне зображення (рис. 1*a*) обрізаємо та переходимо до півтонового, здійснюємо медіанну фільтрацію з апертурою 5×5 пікселів для згладжування адитивних та імпульсних шумів зображення, поліпшуємо контраст, вирівнюючи гістограми (рис. 1*b*), сегментуємо його методом бінаризації за порогом, виділяючи ядра (білий колір) (рис. 1*c*) і зв'язки (чорний колір) (рис. 1*d*).

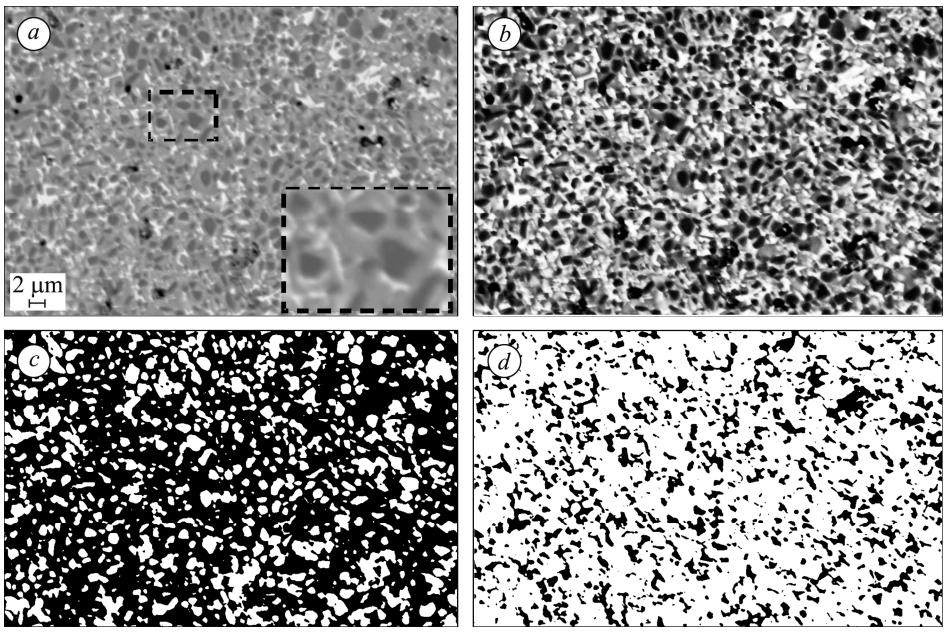

Рис. 1. Процедура виділення карбідів і їх ядер.

Fig. 1. Procedure of carbide grains and their cores selection.

За результатами підрахунку площ карбідних зерен і їх ядер будували графіки розподілу розмірів за відповідними діаметрами (рис. 2). За формулами (4)–(6) визначили об'ємні частки карбідних зерен (0,778), ядер (0,274) і зв'язок (0,222).

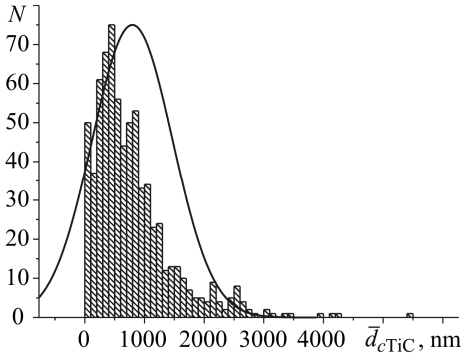

Рис. 2. Розподіл розмірів ядер карбідних зерен сплаву TiC–VC–5 нано WC–NiCr. ▨ – WC5 нано, ×2000.

Fig. 2. Distribution of the carbide grains cores sizes of the TiC–VC–5 nano WC–NiCr alloy. ▨ – WC5 nano, ×2000.

ВИСНОВКИ

Розроблено програмний пакет для обробки та аналізу металографічних зображень високодисперсних мікроструктурних компонентів твердих сплавів на основі карбіду титану з додатками нанокарбіду вольфраму, за яким можна оцінювати розміри карбідних зерен та їх ядер і визначати об'ємні частки структурних складників в автоматичному режимі.

РЕЗЮМЕ. Разработан автоматизированный метод оценки параметров кольцевой микроструктуры твердых сплавов TiC–VC–нано WC–NiCr. Программный пакет написан на языке C ++ стандарта 98 с использованием парадигм кроссплатформенного программирования. Для определения объемного содержания основных структурных составляющих сплавов и размеров карбидных зерен использованы основные положения стереометрической металлографии.

SUMMARY. The automated method of estimation of core/rim microstructure of the TiC–VC–nano WC–Ni–Cr hard alloys parameter is developed. The software package was written in C ++ 98 standard with the use of crossplatforms programming paradigms. For determination of the volume part of the main structural components of alloys and sizes of carbide grains main provisions of stereometric metallography are used.

1. *Effect* of Nano WC Alloying Additions on the Structure Formation of TiC–5VC–18NiCr Cermets / L. G. Bodrova, G. M. Kramar, O. V. Mul, I. V. Koval, V. I. Sushynskiy // Proc. World Congress and Exhibition PM-2010 (Florence, Italy, 10–14 October, 2010), EPMA. – London, UK, 2010. – Vol. 3. – P. 479–484.
2. *Relationship* between the structure and properties of polycarbide based hard alloys with nano-WC addings / I. Koval, L. Bodrova, H. Kramar, S. Marynenko // Proc. World Congress and Exhibition PM-2014 (Salzburg, Austria, 21–24 September, 2014), EPMA. – London, UK, 2014. – 19_P3_EP140178. – 6 p.
3. *Автоматизация* анализа металлографических структур / С. В. Литовченко, Т. В. Малыхина, Л. О. Шпагина, В. О. Шпагина // Вісник Харківськ. нац. ун-ту. – 2011. – № 960. – С. 215–223.
4. *ISO 4499-2 (2008).* Hardmetal-metallographic determination of microstructure. P. 2. Measurement of WC grain size, International Standard Organization, Geneva.
5. *A straightforward* method for analyzing the grain-size distribution in WC–Co hardmetals / M. Brieseck, W. Lengauer, B. Gneis, K. Wagner, S. Wagner // 17th Plansee Seminar. – Tyrol, Austr. – 2009. – P. AT13/1. – 10 p.
6. *Roebuck B., Bennett E., and Gee M.* Grain size measurement methods for WC–Co hardmetals // Proc 13th Int. Plansee Seminar. – Metallwerk Plansee, Reutte. – 1993. – Vol. 2. – P. 273–292.
7. *Engqvist H. and Uhrenius B.* Determination of the average grain size of cemented carbides // Int. J. Refractory Metals and Hard Materials. – 2003. – **21**, № 1–2. – P. 31–35.
8. *Комп'ютерний* аналіз характерних елементів фрактографічних зображень / Р. Я. Косаревич, О. З. Студент, Л. М. Свірська, Б. П. Русин, Г. М. Никифорчин // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – **48**, № 4. – С. 53–60.
9. *Салтыков С. А.* Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1970. – 376 с.

Одержано 12.08.2015