

Р.М. Дідковський, к.т.н., доц.

Н.В. Олексієнко, к.т.н., доц.

Черкаський державний технологічний університет

**МОМЕНТНО-СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОЗПОДІЛІВ ЕЛЕМЕНТІВ У ПЕРЕХІДНІЙ ЗОНІ
КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ $V_4C-(Ti-Ni-Mo)$**

У роботі розглянуто методику моментно-спектрального аналізу розподілів елементів композиційних матеріалів. Проведено апробацію методики в ході дослідження перехідної зони композиційного матеріалу $V_4C-(Ti-Ni-Mo)$. Отримані результати підтвердили адекватність фізико-хімічних досліджень відповідних зразків та дозволили виявити особливості тонкої структури перехідної зони.

Постановка задачі. Існує цілий клас матеріалознавчих задач, в яких інженерним інтересом є не лише середні значення показників структури, фізико-хімічні властивості матеріалу та інші макрохарактеристики, а й особливості цих матеріалів на мікрорівні (розподіл хімічних елементів, регулярність мікроструктури тощо). Надійність оцінки вказаних статистичних характеристик безумовно впливає на адекватність прийнятих рішень у ході оптимізації складу та технології виготовлення матеріалу, вироблення імовірнісних критеріїв якості й т.ін.

Унікальні властивості композицій типу «тверде включення–металева зв'язка» (висока твердість, стійкість до зношування та корозії в різних середовищах, жаростійкість, теплопровідність та ін.) не дарма привертають до себе пильну увагу фахівців [1]. Слід зауважити, що ці властивості зумовлені, насамперед, фазовим складом та структурою матеріалу, з'ясування яких повною мірою неможливе без аналізу розподілу хімічних елементів у матеріалі. Тому задача аналізу розподілів хімічних елементів у багатокомпонентних матеріалах традиційно виникає у процесі створення композицій та оптимізації технологічних процесів їх отримання.

Одним з традиційних інструментів вирішення цієї задачі є мікрорентгенспектральний аналіз. Однак обробка даних мікрорентгенспектрального аналізу, співставлення якісних і кількісних результатів, як правило (також традиційно), проводиться „вручну”, що вимагає значних затрат зусиль і часу. Крім того, враховуючи людський фактор, такий аналіз не дозволяє кількісно оцінити загальні структурні особливості розподілів, геометричні характеристики певних зон матеріалу, виявити регулярність мікроструктури, обчислити характерні розміри її елементів, тобто є досить обмеженим в своїх можливостях.

Одним з аспектів аналізу є встановлення структури міжфазних границь та структури і фазового складу границь розділу „неметалічне включення–металева зв'язка”. Результати таких досліджень дозволяють не тільки скласти достовірне уявлення про структуру матеріалу, з'ясувати внутрішні причини зміни тих чи інших властивостей матеріалу (при порівняльному аналізі), а й прогнозувати можливі напрямки оптимізації композиції [2].

Проте, зі збільшенням числа компонентів матеріалу, зрозуміло, зростає похибка оцінки (особливо кількісних) результатів експерименту [3]–[5]. У той же час стрімкий розвиток комп'ютерної техніки та відповідного програмного забезпечення дозволив піддавати досить складним процедурам обробки значні масиви статистичних даних. Тому застосування комп'ютерної техніки у статистичних задачах матеріалознавства є проблемою актуальною і практично значимою.

Як показав аналіз сучасних проблем матеріалознавства, такі питання, як „комп'ютерне матеріалознавство” та „експериментально-статистичні методи і моделі”, рядом спеціалізованих семінарів і конференцій висунуті в розряд пріоритетних напрямків („Моделирование и оптимизация в материаловедении”, Одеса; „Карбиди та матеріали на їх основі”, ІПМ НАН України, Київ; Російський симпозіум з растрової електронної мікроскопії та аналітичних методів дослідження твердих тіл”, Чорноголовка; семінар країн співдружності „Актуальні питання дифузії, фазових та структурних перетворень у сплавах”, Сокирне та ін.). Публікації свідчать про те, що проблема комп'ютерної обробки результатів дослідження структури та фазового складу матеріалів у ході металографічного, мікрорентгенструктурного та мікрорентгенспектрального аналізів є актуальною для матеріалів, що використовуються в різних галузях промисловості (будівництво, машинобудування, нафтогазова промисловість) [6]–[9].

Потрібно зауважити, однак, що основні зусилля дослідників зосереджені на процедурах побудови нелінійних кореляційних моделей, що пов'язують характеристики структури матеріалу з його експлуатаційними властивостями, комп'ютерних методиках планування експерименту тощо. При цьому статистична база для таких досліджень отримується традиційними методами.

У даній роботі автори пропонують методику, яка дозволяє не тільки автоматизувати процедуру аналізу даних, а й отримати деякі нові уявлення щодо досліджуваного зразка.

Методики моментного та спектрального аналізу ґрунтуються на розвиненому математичному апараті та добре зарекомендували себе, зокрема в статистичній радіотехніці, де є одними з основних інструментів дослідження сигналів і систем. В матеріалознавстві, проте, вони поки що не знайшли широкого застосування, хоча для цього є всі передумови.

Відпрацювання запропонованої методики проводилось при дослідженні розподілів елементів композиційного матеріалу $B_4C-(Ti-Ni-Mo)$ у перехідній зоні “карбід бору–металева зв’язка”. Вибір об’єкта досліджень пояснюється трьома факторами: практичною значимістю використання матеріалів даного типу в нафтогазовій промисловості; наявністю повної технологічної інформації щодо виготовлення досліджуваних зразків; докладним попереднім аналізом даних зразків традиційними методами, що дозволяє порівнювати результати досліджень і з’ясувати їх адекватність. Розглянемо ці моменти докладніше.

Одним з головних напрямів поліпшення експлуатаційних характеристик породоруйнівного інструмента в нафтогазовій промисловості є створення нових кераміко-металевих матеріалів із підвищеною зносостійкістю.

Важливим для такого типу матеріалів є:

- пошук адгезіно-активних зв’язок, які з одного боку забезпечували б міцний зв’язок між компонентами, а з іншого – високі фізико-механічні властивості;
- вибір оптимального методу одержання, який би дав можливість досягти мінімальної пористості, стабільної структури та властивостей;
- детальна інформація про можливі процеси структуроутворення в перехідних зонах “неметалева включення–металева зв’язка”.

Для композиційного матеріалу $B_4C-(Ti-Ni-Mo)$ дані питання є практично вирішеними [10]–[11]. Структура та фазовий склад поверхні розділу гранула $B_4C-(Ti-Ni-Mo)$ зв’язка детально розглянуті в [10]. Дана зона являє собою двофазну область зі складом TiC та $(Ti,Mo)C$, формування якої проходить за рахунок дифузійних процесів. Боридних фаз не виявлено, що пояснюється малим часом взаємодії гранул B_4C з евтектичним розплавом зв’язки $Ti-Ni-Mo$ (табл. 1) та присутністю вільного C у вихідних гранулах B_4C . Проте можливість їх утворення в надзвичайно малих кількостях, зареєструвати які експериментально надзвичайно складно, не виключається. Нікель має невисоку концентрацію і дисперсно розподілений в області зв’язки. Розподіл цього елемента не справляє значного впливу на характеристики композиту в цілому, тому в даному дослідженні аналізу розподілу Ni особливої уваги не приділяється.

Дослідження проводилися на зразках, отриманих двома різними методами (табл. 1), що дозволило провести порівняльний аналіз та виявити особливості розподілів, залежні від технологічних параметрів.

Таблиця 1

Режими спікання композиційного матеріалу $B_4C-(Ti-Ni-Mo)$

| Метод спікання | T, K | $\tau_{нагр.}, c$ | $V_{нагр.}, K/c$ | P, MPa |
|-------------------------------------|--------|-------------------|------------------|----------|
| Вільне рідкофазне спікання (ВРС) | 1323 | 300 | 0,833 | – |
| Гаряче ізостатичне пресування (ГІП) | 1323 | 300 | 0,166 | 100 |

Отже метою даної роботи є, по-перше, розробка методики моментно-спектрального аналізу розподілів хімічних елементів у композитних матеріалах та, по-друге, виявлення за допомогою даної методики особливостей структури розподілів Ti, Mo, C, B у перехідній зоні “неметалева включення–металева зв’язка” композиційного матеріалу $B_4C-(Ti-Ni-Mo)$.

Методика дослідження. Фотографічні зображення розподілів Ti, Mo, C, B отримані за допомогою растрового електронного мікроскопа “Stereoscan–200” фірми “Lego” зі збільшенням $\kappa = 100\mu m/4,5\text{sm}$. Дані зображення переведені в цифрову форму шляхом сканування на BeagPaw 2400CS Plus з роздільною здатністю $\Delta f = 600$ dpi.

Не важко підрахувати, що відстань між двома найближчими розрізненими точками зображення відповідає відстані на досліджуваному зразку, що становить

$$\Delta\lambda = \frac{\kappa}{\Delta f} = 9 \cdot (407) \cdot 10^{-8} m.$$

В результаті отримані матриці чисел $a_{i,j}$ ($i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$), що пропорційні яскравості відповідних точок $(x_i, y_j) = (\Delta\lambda i, \Delta\lambda j)$ зображення розподілу, отже характеризують відносну концентрацію елемента. Зауважимо, що в даній роботі було обрано $m = n = 500$. Такий вибір параметрів відповідно до теореми Котельникова [12] дозволяє за допомогою спектрального аналізу виявляти періодичні структури з частотою від $f_0 = 2.126 \cdot 10^4 m^{-1}$ до $f_1 = 5.315 \cdot 10^6 m^{-1}$.

У подальшому на графіках мінімальну розрізнену частоту f_0 будемо використовувати як одиницю частоти, а мінімальну розрізнену відстань $\Delta\lambda$ – як одиницю довжини.

За допомогою спеціально створених кадруючих рамок та розробленого програмного забезпечення (рис. 1) досягнута висока точність прив'язки зображення розподілів. У результаті зміщення матриць при процедурі аналогово-цифрового перетворення різних розподілів один відносно одного становить не більше 2–3 елементів зображення $\Delta\lambda$.



Рис. 1. Програма прив'язки і перетворення цифрових зображень у матриці чисел

У ході досліджень будемо використовувати дискретне перетворення Фур'є. Якщо A_v ($v = 0, 1, \dots, n-1$) – вектор, то обчислимо:

$$C_v = \sum_{p=0}^{n-1} A_p e^{-2\pi \frac{v p}{n} i}, \quad v = 0, 1, \dots, n-1.$$

Тоді $W_v = |C_v|$ – амплітудний спектр, а $\Phi_v = \arg(C_v)$ – фазовий спектр.

Якщо $A_{v,\mu}$ ($v = 0, 1, \dots, n-1, \mu = 0, 1, \dots, m-1$) – двовимірна матриця, то відповідно отримаємо:

$$C_{v,\mu} = \sum_{p=0}^{n-1} \sum_{q=0}^{m-1} A_{p,q} e^{-2\pi \left(\frac{v p + \mu q}{n m} \right) i}, \quad v = 0, 1, \dots, n-1, \mu = 0, 1, \dots, m-1,$$

$W_{v,\mu} = |C_{v,\mu}|$ – амплітудний спектр, а $\Phi_{v,\mu} = \arg(C_{v,\mu})$ – фазовий спектр. У цих формулах i – уявна одиниця.

Для кожної матриці $(a_{i,j})$, що характеризує концентрацію того чи іншого елемента, обчислимо середні значення вздовж лінії розділу гранули і металеві зв'язки (яку розташуємо паралельно осі ординат так, щоб металева зв'язка знаходилася ліворуч, а неметалева гранула – праворуч) та в ортогональному напрямку. Позначимо дані моменти відповідно

$$m_1^a(i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{i,j}, \quad m_1^a(j) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m a_{i,j}.$$

Виконаємо дискретне перетворення Фур'є від матриці $(a_{i,j})$ та обчислених моментів. Позначимо відповідні амплітудні спектри $w^a(i, j)$, $w_1^a(i)$ та $w_1^a(j)$, а фазові – $\varphi^a(i, j)$, $\varphi_1^a(i)$ та $\varphi_1^a(j)$.

Наступний етап дослідження полягає в аналізі сумісних розподілів пар елементів. Нехай матриця $(a_{i,j})$ відповідає концентрації одного елемента, а матриця $(b_{i,j})$ – іншого. Обчислимо сумісні моменти:

$$m_{1,1}^{ac}(i, k) = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n a_{i,p} c_{k,p}, \quad k = 1, 2, \dots, m, \quad m_{1,1}^{ac}(j, \ell) = \frac{1}{m} \sum_{p=1}^m a_{p,j} c_{p,\ell}, \quad \ell = 1, 2, \dots, n$$

та коефіцієнт кореляції $r(a,b)$. Визначимо також амплітудні $w_{1,1}^{ac}(i,k)$, $w_{1,1}^{ac}(j,\ell)$ та фазові $\varphi_{1,1}^{ac}(i,k)$, $\varphi_{1,1}^{ac}(j,\ell)$ спектри. Крім того, дослідимо суму матриць $(c_{i,j}) = (a_{i,j}) + (b_{i,j})$: обчислимо перші моменти $m_1^c(i)$, $m_1^c(j)$; амплітудні спектри $w_1^c(i)$, $w_1^c(j)$, $w^c(i,j)$; дисперсію $D(c)$.

Результати дослідження. На рисунках 2 і 3 наведено фотографії перехідної зони матеріалу, отриманого за технологіями ВРС та ГПП відповідно. Пункти б) і в) подають зображення розподілів титану і бору.

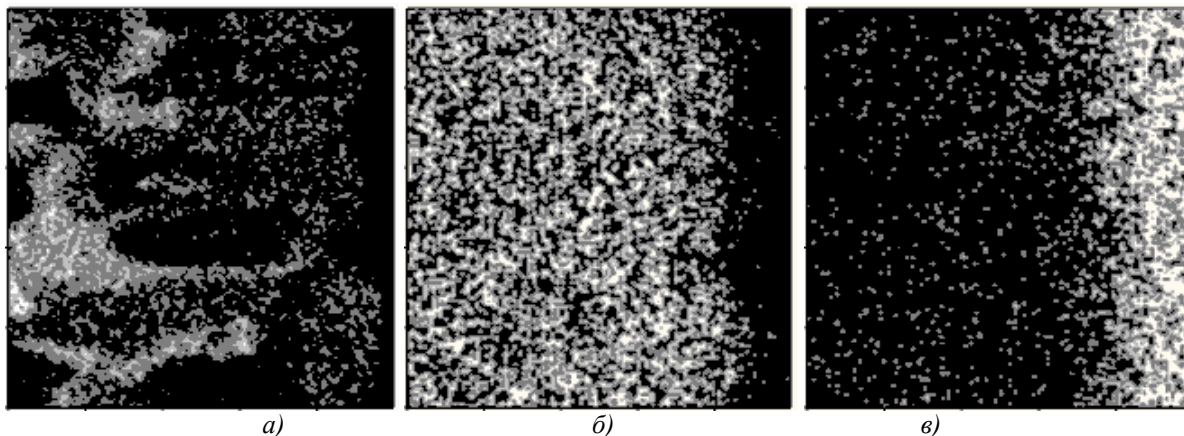


Рис. 2. Фотографія перехідної зони, отриманої за технологією ВРС (а); розподіл титану (б); розподіл бору (в).

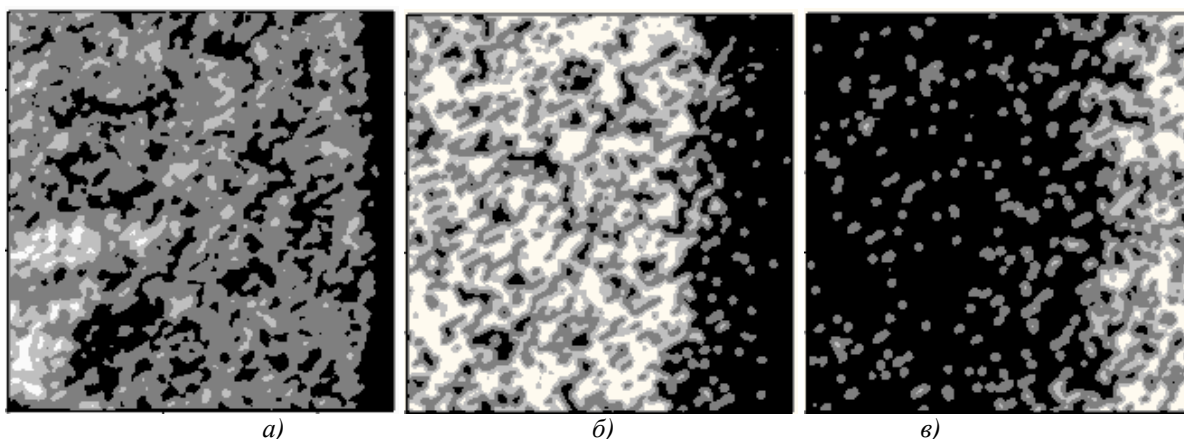


Рис. 3. Фотографія перехідної зони, отриманої за технологією ГПП (а); розподіл титану (б); розподіл бору (в).

Розглянемо результати моментного та спектрального аналізу розподілів цих та інших елементів. На рис. 4 та 5 зображено, наприклад, перші моментні функції, що отримані при усередненні розподілів у напрямку, ортогональному до лінії розділу гранули і зв'язки, та їх амплітудні спектри.

Особливості графіків, наведених на рисунках, характерні для розподілів всіх елементів. Слід зазначити, що у випадку технології ВРС моментні функції змінюються більш різко і хаотично порівняно з моментними функціями зразків, отриманих за технологією ГПП. Цей факт знайшов своє відображення у спектрах функцій. Спектри моментних функцій зразків технології ГПП зосереджені в області середніх частот, а технології ВРС, повільно спадаючи, простягаються далеко в область високих частот, що підкреслює хаотичність розподілу. Отже перехідна зона, що отримана за технологією ГПП характеризується наявністю досить регулярних структур середніх розмірів ($30 \div 150 \cdot \Delta\lambda$).

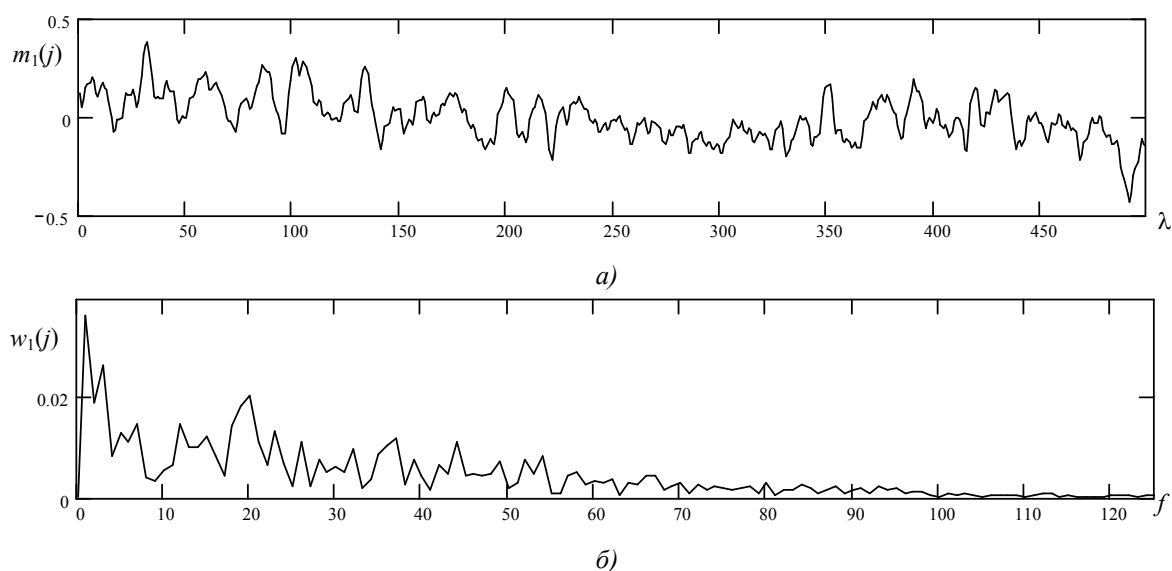


Рис. 4. Момент $m_1(j)$ розподілу титану (а) та його амплітудний спектр $w_1(j)$ (б) при технології ВРС

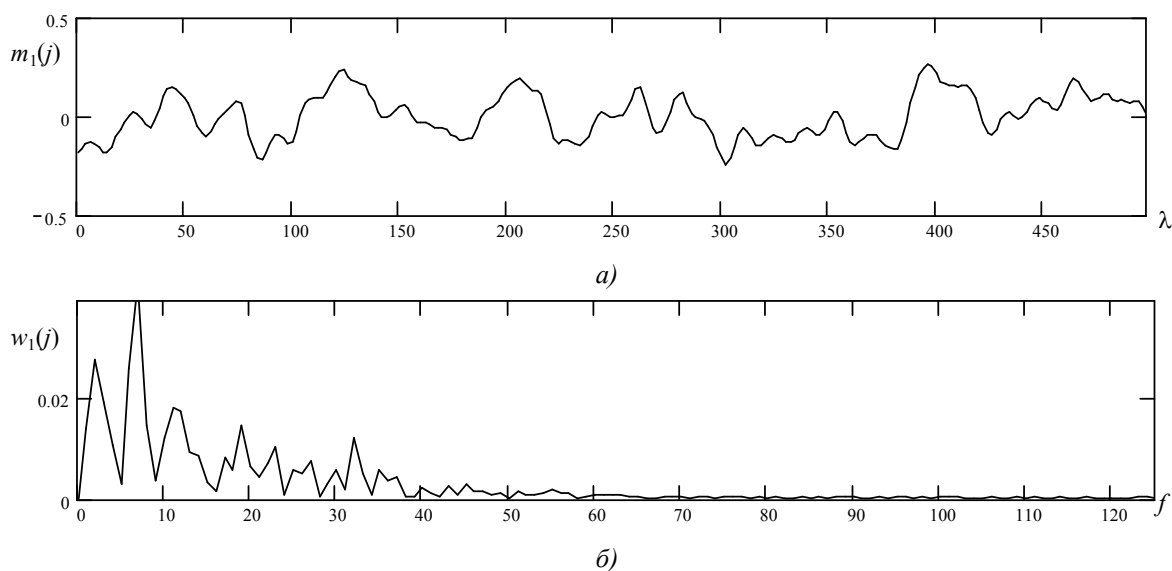


Рис. 5. Момент $m_1(j)$ розподілу титану (а) та його амплітудний спектр $w_1(j)$ (б) при технології ГПП

Моментні функції, обчислені шляхом усереднення матриць розподілів вздовж лінії розділу, загалом мають спільні риси і аналогічну швидкість зміни низькочастотної компоненти при переході через лінію розділу гранули і зв'язки. Однак як і для моментів $m_1(j)$, так і для моментів $m_1(i)$ при технології ВРС спостерігаються більш високочастотні компоненти амплітудних спектрів.

Таким чином, дослідження моментних функцій та їх спектрів, обчислених для розподілів окремих елементів, дозволяє виявити особливості структури перехідної зони. Як буде показано нижче, дослідження сумісних моментів другого порядку дозволяє проаналізувати питання взаємодії елементів в тій чи іншій зоні композиційного матеріалу.

На рис. 6 та 7 наведено поверхні (яскравість точки відображає висоту точки), що відповідають сумі розподілів бору і титану (а) та взаємним моментам при усередненні вздовж перехідної зони (б) і в ортогональному напрямку (в) для технологій ВРС та ГПП відповідно.

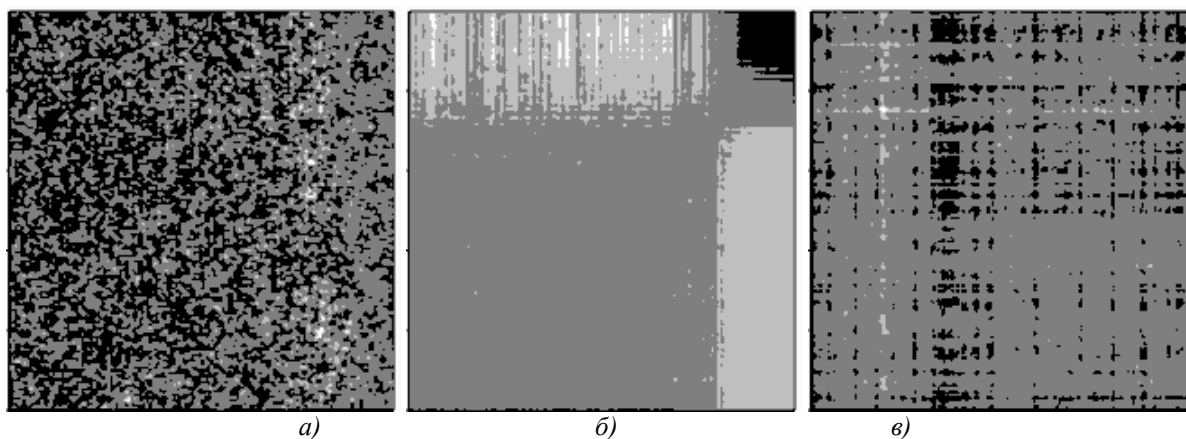


Рис. 6. Сума розподілів бору і титану в зразку, отриманому за технологією ВРС (а); момент $m_{1,1}^{B,Ti}(i,k)$ (б); момент $m_{1,1}^{B,Ti}(j,l)$ (в)

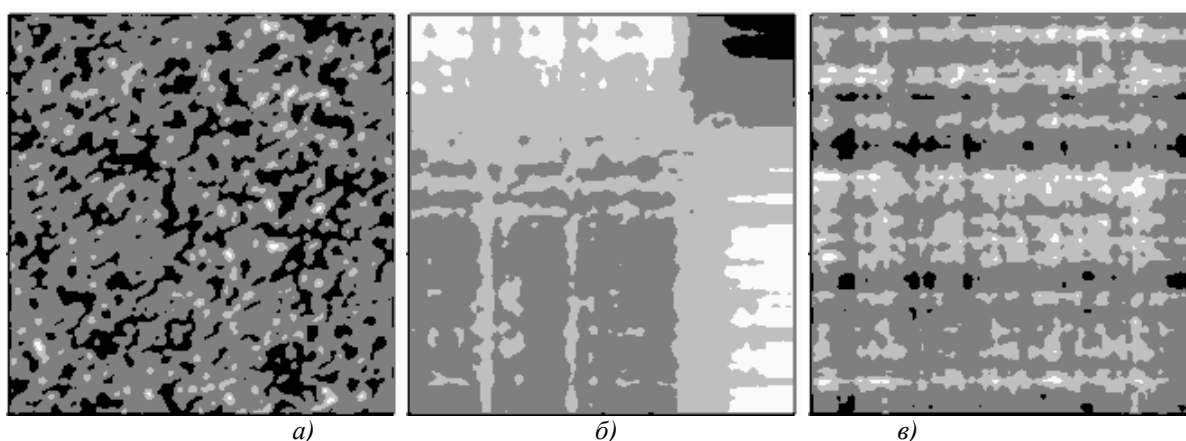


Рис. 7. Сума розподілів бору і титану в зразку, отриманому за технологією ГПП (а); момент $m_{1,1}^{B,Ti}(i,k)$ (б); момент $m_{1,1}^{B,Ti}(j,l)$ (в)

Яскраві точки на рис. 6 і 7 (а) відповідають взаємодії титану і бору. Як видно з рисунків, таких зон взаємодії ніскільки мало, вони носять локальний дисперсний характер, отже на загальні властивості зразка суттєво впливати не можуть. Слід зазначити, що для зразка ВРС зони взаємодії $Ti-B$ більш зосереджені біля лінії розділу гранули і зв'язки, ніж для зразка ГПП.

На рис. 6, 7 (б) абсциса відповідає абсцисі в розподілі бору, а ордината – абсцисі в розподілі титану. Яскраві точки відповідають ситуації, при якій концентрація бору і титану або одночасно висока, або одночасно низька. Темні ж точки символізують високу концентрацію одного елемента і водночас низьку – іншого.

Оскільки діагоналі прямокутників пофарбовані в темний колір, то маємо, що одночасно бор і титан у значній кількості майже не зустрічаються (не спостерігається також одночасна відсутність цих елементів). Надзвичайно темне забарвлення правого верхнього кута відповідає високій концентрації бору в гранулі й одночасну відсутність в ній титану. Світла ділянка справа-знизу позначає одночасну високу концентрацію бору в гранулі та титану у зв'язці, а зліва-вгорі – одночасну низьку концентрацію бору в зв'язці та титану в гранулі. Темне забарвлення лівого нижнього кута відображає високу концентрацію титану у зв'язці та низьку бора. Більш контрастна картина (для технології ГПП) та відмінності конфігурації рисунку відбивають особливості структури перехідної зони.

Сумісні моментні функції розподілів бору і титану, що отримані шляхом усереднення розподілів у напрямку ортогональному лінії розділу гранули і зв'язки (рис. 6, 7 (в)), відображають розміри та періодичність структури перехідної зони. Загалом темне забарвлення даних рисунків свідчить про надзвичайно малий рівень взаємодії бору і титану в досліджуваному композиційному матеріалі.

За аналогічною методикою було досліджено також інші пари хімічних елементів, що входять до складу зразків. Однак аналіз та викладення результатів таких досліджень виявляється досить громіздким. Навпаки, досить компактні та прості для інтерпретації результати дає дисперсійний та кореляційний аналіз.

Для спрощення досліджень розподіли попередньо були нормовані до нульового середнього та одиничної дисперсії. Для таких нормованих розподілів обчислено дисперсію суми та коефіцієнт кореляції.

Інтерпретація результатів відбувається таким чином:

- якщо дисперсія суми близька до 2, а коефіцієнт кореляції до 0, то є суттєві підстави для прийняття гіпотези про незалежність розподілів даної пари елементів.
- якщо дисперсія суми більше 2, а коефіцієнт кореляції додатний, то можна говорити про “позитивну узгодженість” розподілів, тобто зростання концентрації одного елемента супроводжується зростанням концентрації іншого і навпаки.
- якщо дисперсія суми менше 2, а коефіцієнт кореляції від’ємний, то це означає що зростання концентрації одного елемента супроводжується водночас зменшенням концентрації іншого і навпаки. Назвемо умовно таку ситуацію “негативною узгодженістю”.

Досить складними для інтерпретації могли би бути комбіновані випадки, однак на практиці вони в дослідженнях не зустрічалися. Оскільки аналіз результатів має в основному порівняльний характер, то рівні значимості, на яких може бути прийнята та чи інша гіпотеза, нами не визначалися.

Результати обчислень зведено в таблицю 2.

Таблиця 2

Дисперсія суми розподілів та коефіцієнти кореляції між розподілами елементів композиційного матеріалу $V_4C-(Ti-Ni-Mo)$

| Пари елементів | Технологія ВРС | | Технологія ГПП | |
|----------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|
| | Дисперсія суми | Коефіцієнт кореляції | Дисперсія суми | Коефіцієнт кореляції |
| <i>Ti-Mo</i> | 2.260 | 0.113 | 2.382 | 0.191 |
| <i>Ti-C</i> | 2.141 | 0.070 | 2.013 | 0.007 |
| <i>Ti-B</i> | 1.164 | -0.418 | 0.578 | -0.711 |
| <i>Mo-C</i> | 1.965 | -0.018 | 2.000 | -0.0001 |
| <i>Mo-B</i> | 1.693 | -0.154 | 1.630 | -0.185 |

Як видно з таблиці, розподіл вуглецю є майже незалежним від розподілу металів – титану і молібдену, причому найбільш яскраво ця тенденція виявляється для зразків виготовлених за технологією ГПП. Невеликі відхилення в сторону “позитивної узгодженості” спостерігаються в парі *Ti-C*, а в парі *Mo-C* – в сторону “негативної узгодженості”. Титан і молібден показують в своїх розподілах “позитивну узгодженість”, яка з’являється за рахунок їх одночасної відсутності в гранулі. У межах зв’язки розподіли даних елементів практично є незалежними, тому коефіцієнти невеликі за модулем. Бор виявляє “негативну узгодженість” розподілу як з титаном, так і з молібденом. Причому цей факт більш яскраво виражений для зразків, виготовлених за технологією ГПП. Найбільший за модулем від’ємний коефіцієнт кореляції спостерігається у парі *Ti-B* технології ГПП.

Дисперсійний аналіз дозволяє дослідити взаємодію елементів також і в більш складних комбінаціях. Таблиця 3 містить результати таких розрахунків. З метою спрощення аналізу, як і в попередньому випадку, розподіли попередньо нормують до нуля за математичним сподіванням та до одиниці – за дисперсією.

Таблиця 3

Дисперсія суми груп розподілів елементів композиційного матеріалу $V_4C-(Ti-Ni-Mo)$

| Групи розподілів | Дисперсія суми | |
|------------------|----------------|----------------|
| | Технологія ВРС | Технологія ГПП |
| <i>Ti-Mo-B</i> | 2.083 | 1.591 |
| <i>Ti-Mo-C</i> | 3.332 | 3.395 |
| <i>Ti-B-C</i> | 2.096 | 1.605 |
| <i>Mo-B-C</i> | 2.448 | 2.643 |

| | | |
|------------------|-------|-------|
| <i>Ti-Mo-B-C</i> | 2.979 | 2.617 |
|------------------|-------|-------|

На рис. 8 зображено суми розподілів титану, молібдену, бору та вуглецю та перші моментні функції цих сум, утворені усередненням вздовж лінії розділу гранули і зв'язки.

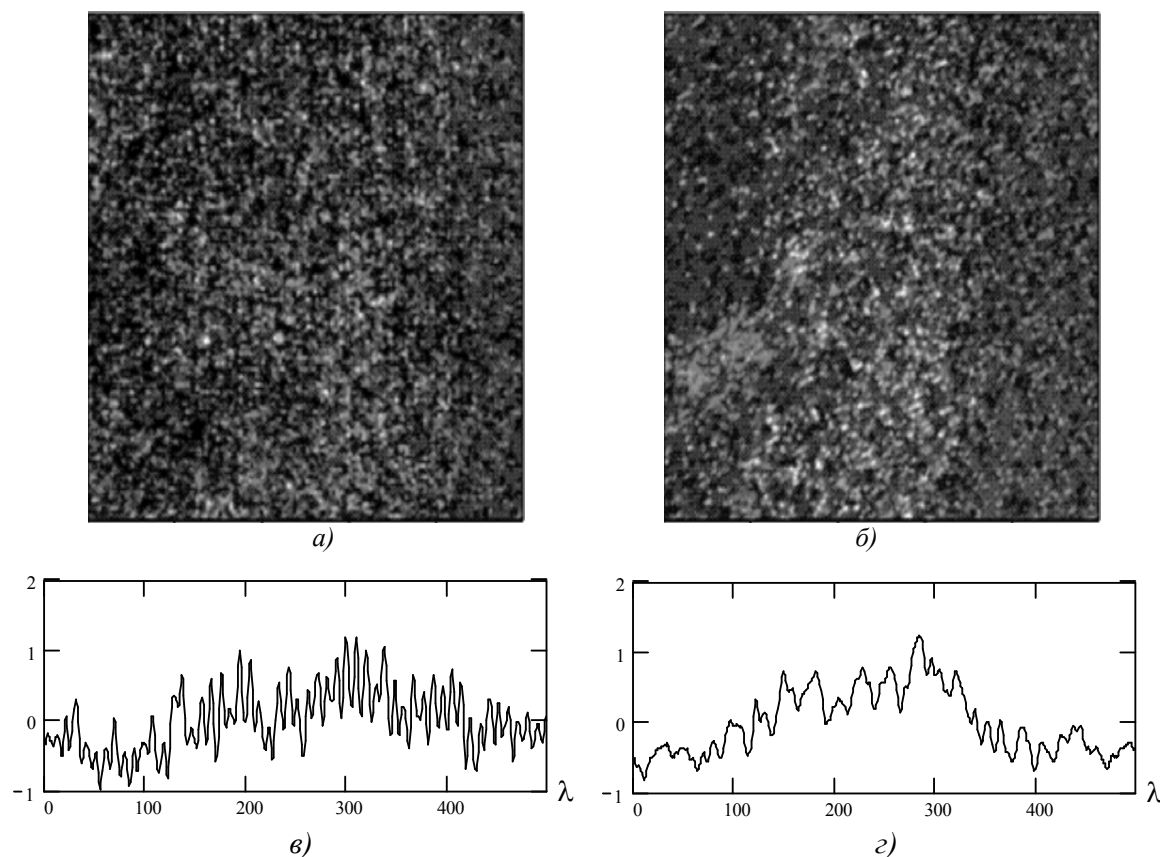


Рис. 8. Сума розподілів *Ti*, *Mo*, *B* і *C*: а) при технології ВРС; б) при технології ГП. Моменти сум $m_1(i)$: в) при технології ВРС; г) при технології ГП

Аналіз даних показує наступне. Найбільш узгодженими виявляються розподіли *Ti*, *Mo* і *C*. При додаванні до суми розподілів даних елементів додатково розподілу бору замість збільшення дисперсії на 1 (як мало би бути при незалежності розподілів), дисперсія зменшується більш ніж на 0,3 при технології ВРС і більш ніж на 0,7 при технології ГП. Це означає, що бор переважно заповнює місця, вільні від даних елементів. Найменшу дисперсію (близько 2 для ВРС та близько 1,6 для ГП) мають суми трійок розподілів *Ti-Mo-B*

та *Ti-B-C*. Додавання до цих трійок відповідно розподілів вуглецю та молібдену збільшує дисперсію майже рівно на одиницю. Це означає, що розподіли вуглецю і молібдену незалежні від сукупності інших розподілів. Менш ніж на одиницю, а саме на 0,531, збільшується дисперсія при додаванні розподілу *Ti* до групи *Mo-B-C* при технології ВРС. При технології ГП дисперсія навіть дещо зменшується. Отже розподіл титану “негативно узгоджений” з розподілами інших елементів.

Як видно з порівняння колонок таблиці 3, при технології ГП всі зазначені вище особливості виявляються більш яскраво вираженими, ніж при технології ВРС. Зокрема дисперсія суми розподілів чотирьох елементів *Ti-Mo-B-C* при технології ГП менша на 0,362.

Наочно це спостерігається на рис. 8, а) та 8, б) більш рівномірно сірим забарвленням другого з них. Рисунок 8, в) та 8, г) додатково ілюструють особливості структури перехідної зони. Як бачимо, перехідна зона при технології ГП має більш впорядковану структуру з елементами середніх розмірів. Ці висновки узгоджуються з результатами досліджень розподілів окремих елементів.

Висновки

1. Розроблена методика моментно-спектрального аналізу розподілів хімічних елементів в композиційних матеріалах, яка апробована на зразках композиту $B_4C-(Ti-Ni-Mo)$, а саме на перехідній зоні “неметалева включення–металева зв'язка”.

2. Результати проведених досліджень не відкидають гіпотезу про можливість утворення в перехідній зоні гранула-зв'язка композиційного матеріалу $B_4C-(Ti-Ni-Mo)$ (технологія ВРС) боридів (швидше за все TiB_2). До того ж тепер є абсолютно зрозуміло, що при ВРС технології бор у незначних кількостях дифундує із карбідних гранул, чого не можна стверджувати для ГПП технології.

3. Отримані результати добре узгоджуються з результатами попередніх досліджень, викладеними в [10] і [11], що дозволяє підвищити надійність висновку про адекватність як одних, так і інших.

4. Методика моментно-спектрального аналізу розподілів елементів дозволяє не тільки підтвердити результати традиційних методик, а й отримати нові. Зокрема дана методика дозволяє дослідити геометричні характеристики перехідної зони, охарактеризувати її структуру, виявити регулярність структури, обчислити характерні розміри елементів тощо. Крім того, завдяки даній методиці стає можливим виявлення сполук (принаймні можливості їх утворення), які не можливо зареєструвати фізичними методами.

5. Запропонована методика моментно-спектрального аналізу розподілів елементів у композиційних матеріалах органічно доповнює арсенал фізичних методів досліджень, дозволяє загалом підвищити рівень адекватності результатів, дослідити особливості тонкої структури перехідної зони гранула-зв'язка, виявити можливість утворення сполук (та їх локалізацію), що не реєструються фізичними методами.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Бондаренко В.П. Сучасний стан дослідження та проблема організації виробництва твердих сплавів // Вісник НАНУ. – 1996. – № 5–6. С. 25–27.
2. Олексієнко Н.В. Формування структури композиційного наплавочного матеріалу на основі гранул карбіду бору з $(Ti - Ni - Mo)$ зв'язкою: Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. – Київ, 1999.
3. Захаров А.М., Казаков Н.И., Бурмистрова Н.П. Влияние рения, углерода, алюминия и бора на фазовый состав молибдена при 2000 – 1200° С // Металлы. – № 2. – 1988. – С. 187–190.
4. Губенко С.И. К вопросу о строении границ неметаллическое включение – матрица в стали // Металлы. – 1994. – № 6. – С. 105–112.
5. Структура и свойства внутренних поверхностей раздела в металлах. / Б.С. Бакштейн, Ч.В. Копецкий, П.С. Швиндлерман и др. – М.: Наука, 1988. – 298 с.
6. Шостак А.В., Бобро Ю.Г. Новый метод компьютерного фракторграфического анализа микроструктуры твердых тел по их РЭМ-изображениям: Материалы к 38-му международному семинару по моделированию и оптимизации композитов. – Одесса, 1999.
7. Дубницький В.Ю. Определение доверительного интервала процентного содержания компонентов композита: Материалы к 38-му международному семинару по моделированию и оптимизации композитов. – Одесса, 1999.
8. Черкасс О.А. Моделювання міжфазного шару у волокнистих металокомпозитах: Материалы к 39-му международному семинару по моделированию и оптимизации композитов. – Одесса, 2000.
9. Дідковський Р.М., Дубровська Г.М., Олексієнко Н.В. Моментний та спектральний аналіз розподілів бору і титану в композиційному матеріалі $B_4C - (Ti - Ni - Mo)$: Материалы к 43-му международному семинару по моделированию и оптимизации композитов. – Одесса, 2004. – С. – 155.
10. Олексієнко Н.В. Структура композиційного матеріалу на основі карбіду бору з титан-нікель-молибденовою зв'язкою в залежності від методу його отримання // Вісник ЧІТІ. – № 1. – 1998. – С. 34–38.
11. Дубровская Г.Н., Алексеенко Н.В. Изучение структуры и фазового состава поверхности раздела: неметаллическое включение–металлическая связка композиционного материала $B_4C - (Ti - Ni - Mo)$ // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. – 2000. – № 2. – С. 87–89.
12. Бабак В.П., Хандецький В.С., Шрюфер Е. Обробка сигналів. – К.: Либідь, 1996. – 392 с.

ДІДКОВСЬКИЙ Руслан Михайлович – кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики Черкаського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- методи обробки сигналів;
- оптимізація систем зв'язку.

Тел.: (0472) 43-73-67.

E-mail: didkow@chiti.uch.net

ОЛЕКСІЄНКО Наталія Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики Черкаського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– формування структури та оптимізація технології виробництва композиційних матеріалів.

Тел.: (0472) 43-73-67.

Подано 25.10.2004

Дідковський Р.М., Олексієнко Н.В. Моментно-спектральний аналіз розподілів елементів у перехідній зоні композиційного матеріалу $B_4C-(Ti-Ni-Mo)$

Дидковский Р.М., Алексеенко Н.В. Моментно-спектральный анализ распределений элементов в переходной зоне композиционного материала $B_4C-(Ti-Ni-Mo)$.

Didkowsky R.M., Olexejenko N.V. Moment-spectrum analysis of elements allocations in a transitional band of the compositional material $B_4C-(Ti-Ni-Mo)$.

УДК 519.233.4(519.233.5),621.762

Моментно-спектральний аналіз розподілів елементів у перехідній зоні композиційного матеріалу $B_4C-(Ti-Ni-Mo)$ / Р.М. Дідковський, Н.В. Олексієнко

У роботі розглянуто методику моментно-спектрального аналізу розподілів елементів композиційних матеріалів. Проведено апробацію методики в ході дослідження перехідної зони композиційного матеріалу $B_4C-(Ti-Ni-Mo)$. Отримані результати підтвердили адекватність фізико-хімічних досліджень відповідних зразків та дозволили виявити особливості тонкої структури перехідної зони.

УДК 519.233.4(519.233.5),621.762

Моментно-спектральный анализ распределений элементов в переходной зоне композиционного материала $B_4C-(Ti-Ni-Mo)$ / Р.М. Дидковский, Н.В. Алексеенко,

В работе рассмотрена методика моментно-спектрального анализа распределений элементов в композиционных материалах. Проведена апробация методики в ходе исследования переходной зоны композиционного материала $B_4C-(Ti-Ni-Mo)$. Полученные результаты подтвердили адекватность физико-химических исследований соответствующих образцов и позволили выявить особенности тонкой структуры переходной зоны.

УДК 519.233.4(519.233.5),621.762

Moment-spectrum analysis of elements allocations in a transitional band of the compositional material $B_4C-(Ti-Ni-Mo)$ / R.M. Didkowsky, N.V. Olexejenko

The article focuses on the procedure of a moment-spectrum analysis of elements allocations in compositional materials. The procedure approbation is carried out in the process of research of the composition material $B_4C-(Ti-Ni-Mo)$ transitional band. The obtained results have confirmed the adequacy of physicochemical examining of the appropriate samples and have allowed reveal the features of the transitional band thin structure.