Metalozn. obrobka met. 2019, vol. 25 (92), 26-37
https:// doi.org/

УДК. 669.017- 15‘296‘296+15‘781‘297+26‘297‘296+26‘781297+26‘296‘781

Растрова електронна мікроскопія в дослідженні структур евтектичних сплавів заліза та хрому з тугоплавкими боридами

В. Є. Панарін, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач лабораторії технології сплавів, skywork@imp.kiev.ua

Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ

Проведено порівняльний аналіз можливостей традиційного методу металографічного аналізу структури металів і сплавів та топографічного аналізу поверхні сильно протравлених сплавів, з яких хімічним методом видалено одну із складових (наприклад, металеву) структури. Наводяться потенційні можливості растрової електронної мікроскопії в режимі вторинних електронів через високу роздільну здатність та глибину різкості. Показано, що застосування обох методів доповнює один одного та суттєво збільшує інформацію щодо реальної структури кристалів фаз, що входять до складу сплаву. На прикладі досліджених сплавів на основі заліза та хрому з тугоплавкими боридами продемонстровано можливості поєднання обох методів дослідження структури для розкриття механізму кристалізації сплавів евтектичних систем та прогнозування їх властивостей. З аналізу структур литих сплавів розглянутих евтектичних систем встановлено зміну механізму кристалізації, в залежності від швидкості охолодження, з кооперативного росту складових евтектики на незалежний зріст із формуванням структури тонкого конгломерату фаз. Наводяться реальні форми евтектичних кристалів боридів, їх зв’язок між собою в сплаві з утворенням несучого каркасу боридної фази в евтектичних колоніях, що дозволяє розглядати такі евтектики як композиційні матеріали, а відтак, передбачати їх поведінку в реальних умовах експлуатації. Робота являє інтерес як для розробників нових складів сплавів так і для теорії кристалізації, а також для використання в учбовому процесі в курсах з матеріалознавства.

Ключові слова: *структура сплавів, растрова електронна мікроскопія, евтектики, механізм кристалізації.*

Традиційний метод дослідження структури металів і сплавів (металографія) базується на аналізі зображень, отриманих на пласких металографічних шліфах після травлення їх поверхні відповідними хімічними реактивами [1, 2]. Контраст зображення формується завдяки різному ступеню травлення елементів структури таких як зерна, межі зерен, межі фаз, двійники, дислокації та інші, у зв’язку з різним ступенем відхилення їх від термодинамічної рівноваги, наявності локальних напружень, природи фаз, різного роду дефектів, а відтак і різної взаємодії з реактивом. Утворюється пласке графічне зображення структури перетину сплаву площиною шліфа, яке несе досить велику інформацію щодо

кристалізації і будови сплаву. Метод металографії дозволяє досліджувати як макроструктуру металів і сплавів, наприклад, виливків великого розміру, так і дисперсних елементів структури, за допомогою металографічних світлових мікроскопів із збільшенням до 2000 крат.

Недоліком традиційного металографічного методу є труднощі з екстраполяцією пласких структур шліфа на об'ємні зображення кристалів, які і є достовірними формами реальних елементів будови металу. Так, намагання відтворити об'ємне зображення структури евтектичних сплавів шляхом послідовного накладання пласких фотографій вирізаних структур фаз, довгий час, через великий обсяг робіт, існувало неправильне уявлення щодо механізму зародження та кооперативного росту евтектичних колоній [3, 4].

Із винаходом та широким застосуванням при дослідженні металів електронного растрового мікроскопу (РЕМ) з великою роздільною здатністю, з'явилася можливість аналізу більш тонкої металографічної структури при збільшеннях порядку $x10^5$. Крім того, велика глибина різкості РЕМ в режимі вторинних електронів, дозволила застосувати принципово нову методику дослідження об'ємної структури сплавів шляхом хімічного витравлення та видалення однієї із складових фаз [5-9]. Реактив для травлення підбирається таким чином, щоби інші фази сплаву з ним не взаємодіяли, тобто зберігали свою вихідну не викривлену реактивом форму, отриману в процесі кристалізації. Дослідження об'ємних структур евтектичних сплавів різноманітних систем яскраво підтвердили теорію евтектичної кристалізації, вперше сформульованою академіком А. А. Бочваром та в подальшому розвитою і доповненою в роботах школи металознавців Ю. М. Тарана-Жовніра з Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

У роботі досліджено та порівняно металографічну та об'ємну структуру литих сплавів евтектичних систем заліза та хрому з тугоплавкими боридами, отриманих методом дугової плавки в захисній атмосфері аргону на мідному водоохолоджуваному поді вакуумної печі вольфрамовим невитратним електродом. Швидкість охолодження зливків вагою (30-40) г становила приблизно 100 $^oC/c$, що забезпечило реалізацію в сплавах механізму кооперативного росту евтектичних колоній. Встановлено, що у всіх досліджених сплавах зароджуючою та ведучою фазою евтектичної кристалізації були бориди, що відповідає критеріям для неї, сформульованим в роботі [3]. Глибоке травлення металографічних шліфів для РЕМ з видаленням металевої основи сплаву проводилося в реактивах: 20 % водний розчин брому при температурі -15 ^oC на протязі 20-30 хв. для сплавів на основі заліза та електрохімічне травлення при кімнатній температурі в приладі «Elypovist» на протязі 30-40 хв. у стандартному реактиві на основі спиртового розчину азотної та сірчаної кислоти, для сплавів на основі хрому. Металографічні шліфи травилися у тих самих реактивах, але за менший період часу: 2-4 хв. для сплавів на основі заліза та 4-6 хв. для сплавів на основі хрому. Після травлення усі шліфи ретельно промивалися в струмі проточної води для видалення з поверхні продуктів реакції травлення, які могли застрягнути між кристалами і викривити зображення їх реальних форм.

Структури досліджено на металографічному мікроскопі «Neophot-3» з цифровою камерою для фіксації зображення і виводу його на комп'ютер та растровому електронному мікроскопі «JSM-U3» в режимі вторинних електронів з фіксацією на широкоформатну фотографічну плівку з високою дисперсністю зерна. Для підвищення якості структури зображення оброблялися в програмі «Photoshop CS».

Порівняння фотографій, отриманих металографічних та растрових структур, представлено на рис. 1-5.

Фазовий склад досліджених сплавів було визначено в роботі [5].

Система Fe-TiB_2

Структура евтектичного сплаву (7,8 ваг. % TiB_2) дозволяє оцінити рівномірність розподілення боридної фази по об'єму сплаву (рис. 1 а), але не дає уявлення про реальну форму евтектичних кристалів боридів та механізм кристалізації евтектики. Об'ємне зображення РЕМ цієї ж евтектики показує, що боридна фаза зароджує евтектичну колонію (базовий кристал показано стрілкою 1) та веде евтектичну кристалізацію (рис. 1 б).

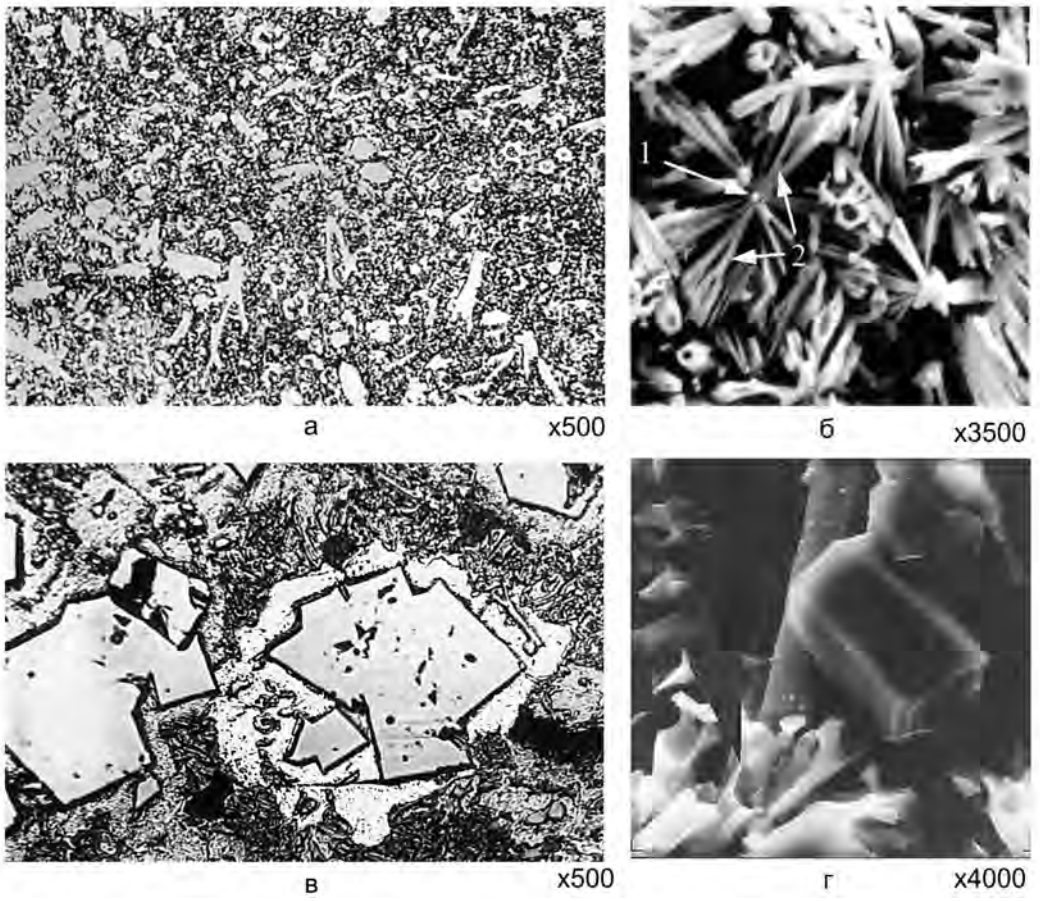

Рис.1. Структура евтектичного (а) та заевтектичного (в) сплавів (12,4 ваг. % TiB_2) системи Fe-TiB_2 та об'ємне зображення РЕМ структур тих самих сплавів (б, г); 1 – базовий кристал TiB_2, 2 – гілкування кристалу TiB_2, стрілка – евтектичні кристали TiB_2.

Форма евтектичних кристалів TiB_2 зберігає фрагменти будови елементарної комірки (гексагональна призма), але трансформується у подовжені, пустотілі кристали, які розширюються по мірі віддалення від базового кристалу внаслідок локального розігріву за рахунок виділення скритої теплоти кристалізації.

Так само, на рис. 1 в, видно утворення ободків навколо надлишкових кристалів боридів, але неможливо визначити їх реальну кристалічну форму. На фотографії РЕМ залізний ободок навколо надлишкових кристалів витравлено (порожнини), але добре видно кристалічну структуру боридів (шестигранні призми різного розміру) та зародження евтектичних колоній (рис. 1 г, показано стрілкою) з їх поверхні.

Система Fe-ZrB_2

Структура доевтектичного сплаву демонструє рівномірний розподіл первинних дендритів твердого розчину на основі заліза з певною переважною орієнтацією осей першого порядку (рис. 2 а), вочевидь, за температурним градієнтом. Визначити, в якому вигляді існує евтектична компонента між первинними дендритами, неможливо. Так само неможливо встановити вигляд кристалів боридів в евтектичних колоніях. Проте, в металографічній структурі заевтектичних сплавів добре видно металеві ободки навколо вигнутих тонких кристалів ZrB_2 (рис. 2 д).

Суттєве доповнення до наведеної інформації додає об'ємна структура зображень РЕМ цих сплавів. Виявляється, що кристали ZrB_2 в доевтектичних сплавах, які входять до складу евтектики і розташовуються між гілками дендритів, мають пластинчасту форму (рис. 2 б) і щільно заповнюють простір між дендритами. Підтвердження пластичної форми евтектичних кристалів бориду видно і на рис. 2 г, де зображено евтектичну колонію, але без металевої компоненти. На цій же фотографії добре видно як евтектична колонія зароджується від базового кристала бориду (показано структурою). Заевтектичні кристали бориду також мають пластинчасту форму (рис. 2 ж) і зігнуті, вочевидь, через виникнення внутрішніх напружень.

Металографічна та об'ємна структури досліджених сплавів системи Fe-ZrB_2 так само, як і у випадку системи Fe-TiB_2, показує, що форма кристалів боридів в обох випадках не змінюється при переході від доевтектичних до заевтектичних сплавів. Ця форма кристалів може відповідати або не відповідати кристалічній будові елементарної комірки бориду, через те, що швидкість зросту кристалів в різних напрямках різна і співвідношення між швидкостями росту в різних напрямках в елементарній комірці і в зростаючому кристалі не зберігається.

Система Fe-HfB_2

На металографічному шліфі литого евтектичного сплаву системи Fe-HfB_2видно, що евтектичні зерна та колонії рівномірно розташовані по всьому об'єму сплаву (рис. 3 а). Базовий кристал бориду (рис. 3 б) має форму шестикутної зірки з порожніми в середині променеподібними

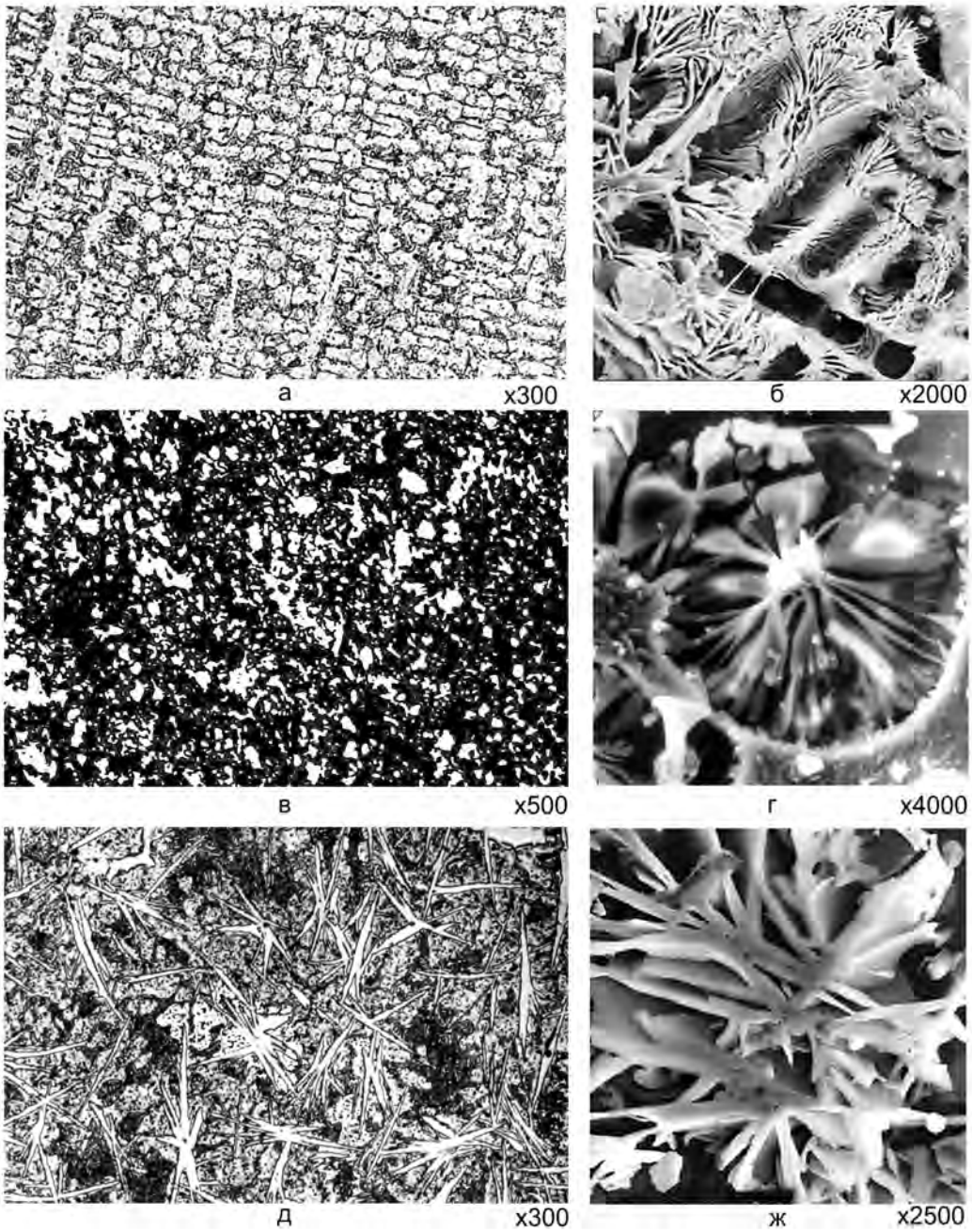

Рис. 2. Структура доевтектичного (а, 7 ваг. % ZrB_2), евтектичного (в, 12 ваг. % ZrB_2) та заевтектичного (д, 25 ваг. % ZrB_2) сплавів системи Fe-ZrB_2 та об'ємне РЕМ зображення структур тих самих сплавів (б, г, ж).

ділянками, поперечний перетин яких розширюється по мірі віддалення від центру. Таке утовщення гілок базового кристалу можна пояснити збільшенням щільності дифузійного потоку атомів з рідини на фронт кристалізації. Зростання дифузійної рухомості атомів перед фронтом кристалізації гілок базового кристалу, вочевидь, пов'язано із зростанням локальної температури за рахунок виділення теплоти кристалізації.

Досягнувши певного розміру базові кристали бориду змінюють свою форму на пластинчасту і у такому вигляді кристалізуються в евтектиці з кристалами заліза за механізмом кооперативного росту.

Пластинчаста форма евтектичних кристалів бориду добре розрізняється після видалення металевої компоненти на зображенні, отриманому в РЕМ (рис. 3 б). Зміна променеподібних порожнин в середині кристалів боридів на пласкі форми, можна пояснити як результат дії одночасно двох факторів: обмеження дифузійної рухомості атомів в рідині перед фронтом кристалізації та переважну швидкість кристалізації у двох напрямках, що формують пласкі кристали.

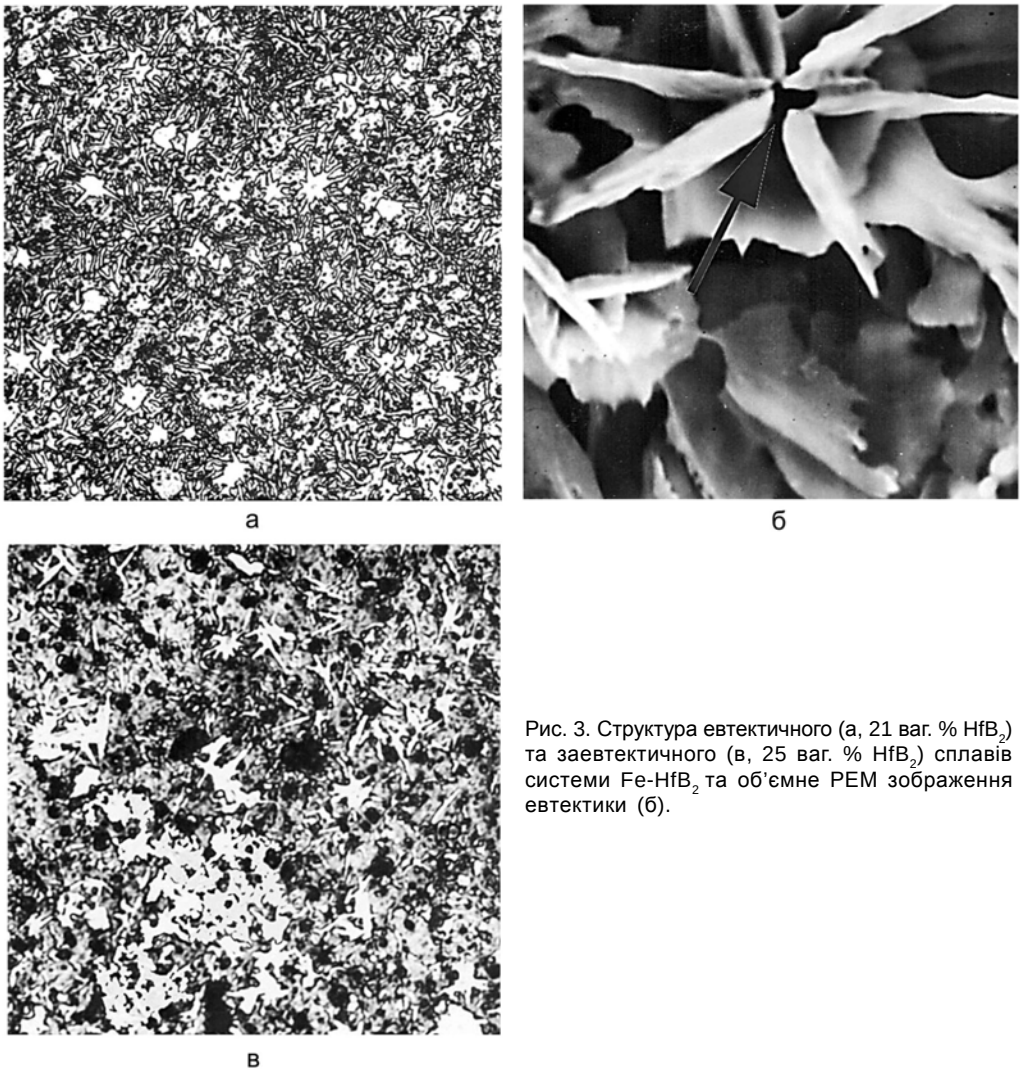

Рис. 3. Структура евтектичного (а, 21 ваг. % HfB_2) та заевтектичного (в, 25 ваг. % HfB_2) сплавів системи Fe-HfB_2 та об'ємне РЕМ зображення евтектики (б).

Система Cr-ZrB_2

Евтектичні кристали дибориду цирконію, як в доевтектичних так і в евтектичному сплаві мають форму тонких пласких кристалів, які загинаються, вочевидь, внаслідок виникнення при кристалізації внутрішніх

напружень другого роду. У заевтектичних сплавах надлишкові кристали збільшуються по товщині, внутрішні напруження через це зростають і вони загинаються ще більше, порівняно з евтектичними кристалами.

Відзначимо, що зростаюча за механізмом кооперативного росту евтектична колонія зберігає постійним, в процесі росту, співвідношення між атомами хрому та дибориду цирконію, які поступають з рідини на фронт кристалізації, таким, якими вони були на стадії формування базового кристалу, через що габітус евтектичної колонії набуває правильної форми (п'яти або шестикутної призми) і не змінюється впритул до безпосереднього контакту з сусідніми колоніями (рис. 4 б). Тобто габітус евтектичної колонії визначається сукупністю пласких п'яти- або шестикутників, що нагадує молекулу фулерену.

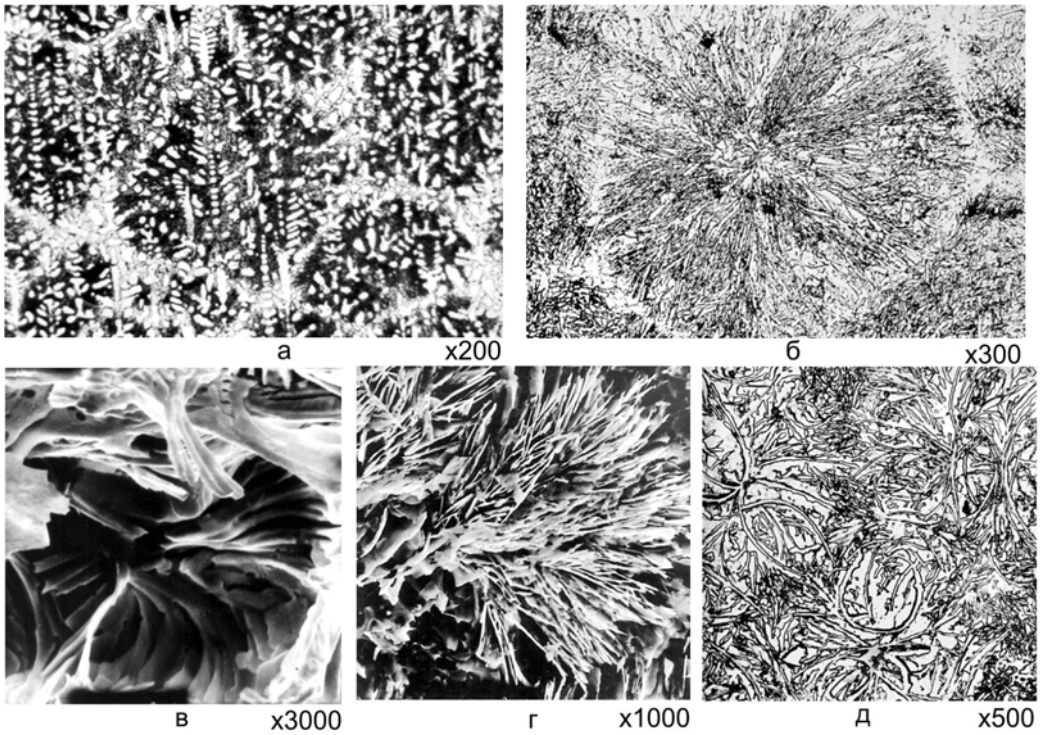

Рис. 4. Металографічна структура доевтектичного (а, 15 ваг. % ZrB_2), евтектичного (б, 20 ваг. % ZrB_2) та заевтектичного сплавів (д, 22 ваг. % ZrB_2) системи Cr-ZrB_2 та її об'ємне зображення РЕМ (в, г).

У місцях безпосереднього розташування надлишкових кристалів дибориду цирконію евтектика вироджується: атоми цирконію і бору кристалізуються на їх поверхні дещо збільшуючи товщину і додаткове згинання через внутрішні напруження,які збільшилися, а атоми хрому кристалізуються незалежно, утворюючи ободок (рис. 4 д).

Система Cr-HfB_2

У доевтектичних сплавах системи Cr-HfB_2 пластинчасті кристали дибориду хрому з евтектичної складової рівномірно розташовані між первинними дендритами твердого розчину на основі хрому (рис. 5 а, б).

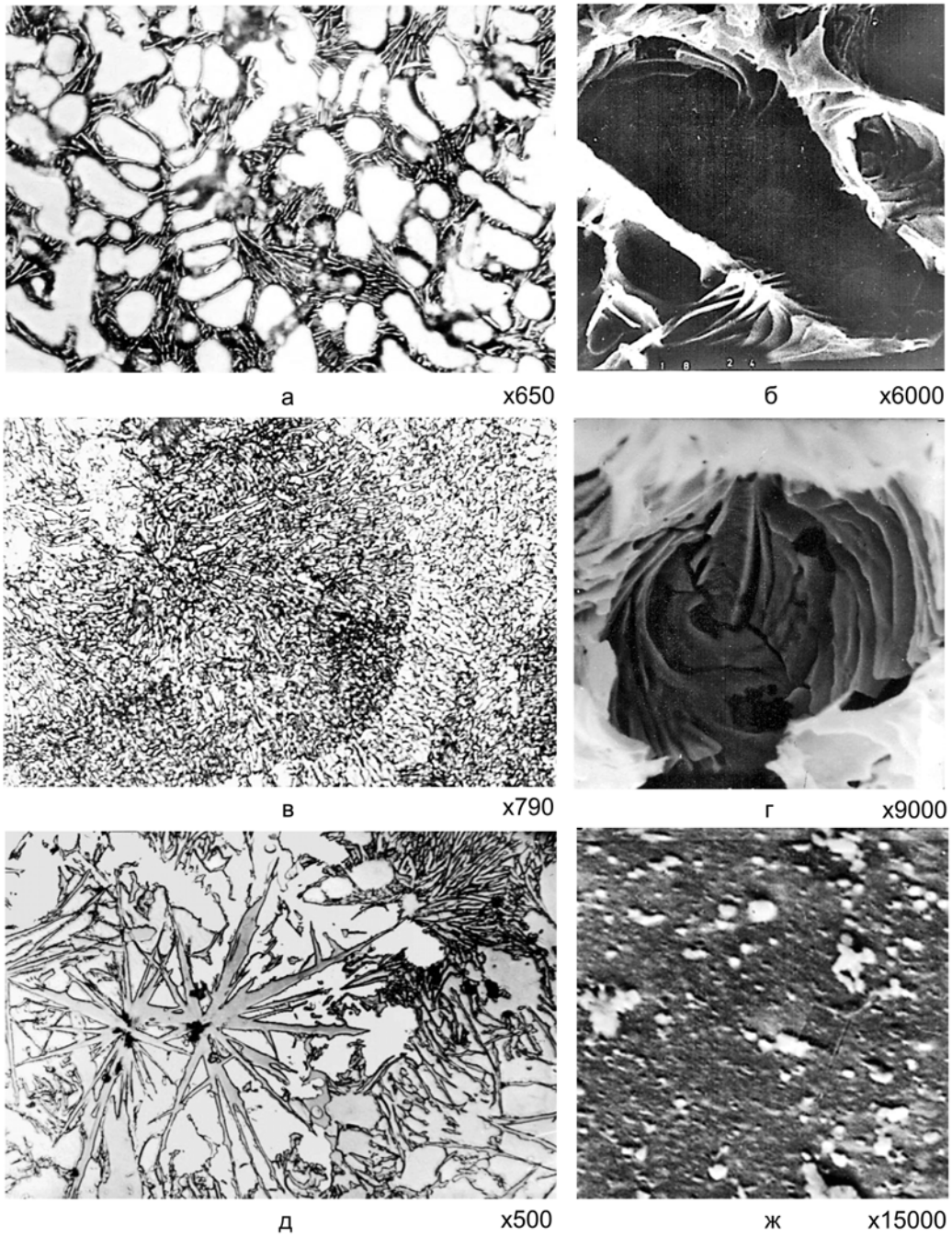

Рис. 5. Металографічна структура доевтектичного (а) (29 ваг. % HfB_2), евтектичного (в) та заевтектичного (д) сплавів системи Cr-HfB_2 та їх об'ємне РЕМ зображення (б, г, ж).

Пластинчаста форма цих кристалів підтверджується зображенням РЕМ на рис. 5 г. Через те, що евтектичні кристали HfB_2 не є пласкими, а вигинаються, набуваючи складні об'ємної форми, вони практично попадають в плаский перетин шліфа у вигляді тонких зігнутих голок (рис. 5 в). Складну форму пласких вигнутих кристалів дибориду, зображених на рис. 5 г, практично

не можна перерізати площиною (шліфа) таким чином, щоби перетин мав вигляд площини. Будь який довільний перетин площиною таких кристалів буде мати вигляд тонких вигнутих стрічок, що ми і бачимо на рис. 5 в та на рис. 5 д. Ефект перетину пласкою поверхнею двояко-вигнутих евтектичних кристалів боридів HfB_2 в заевтектичних сплавах з утворенням зігнутих форм перемінної товщини, демонструє рис. 5 д.

За аналогією з системою Cr-ZrB_2 в заевтектичних сплавах навколо надлишкових кристалів HfB_2формуються ободки з твердого розчину на основі хрому: атоми бориду кристалізуються на поверхні надлишкових кристалів того ж складу, як на готовій підкладці, а твердий розчин на основі хрому кристалізується незалежно у вигляді ободка. На рис. 5 д добре видно як гілки надлишкового кристалу бориду, які у процесі кристалізації перетнули область ободка і зконтактували з рідиною евтектичного складу, з місця контакту зароджують кооперативний зріст обох фаз, що утворюють евтектику, у вигляді колоній.

Якщо невеликий за масою шматочок евтектичного сплаву розплавити окремо на мідній водоохолоджуваній поверхні поду дугової печі, то швидкість його охолодження у таких умовах, буде суттєво вище ніж 100 °С/с і може досягнути критичної величини, за якої відбудеться зміна механізму евтектичної кристалізації з кооперативного росту на незалежний у вигляді тонкого конгломерату фаз (за А. А. Бочваром - Ю. М. Тараном [3]), що демонструє рис. 5 ж.

Висновки

1. Для формування об'єктивного уявлення щодо механізму кристалізації та форми кристалів в евтектичних системах на основі заліза і хрому з тугоплавкими боридами доцільно застосовувати як традиційний металографічний метод дослідження структури, так і об'ємне зображення кристалів, отримане в растровому електронному мікроскопі з глибоким витравленням металевої складової.

2. У всіх досліджених сплавах, в інтервалі швидкостей охолодження не вище 100 °С/с, спостерігається механізм кооперативного росту евтектик з формуванням колоніальних структур, в яких тугоплавкі бориди є зароджуючою та ведучою фазою евтектичної кристалізації.

3. При досягненні критичної швидкості охолодження для евтектичного сплаву системи Cr-HfB_2, яка перевищує 100 °С/с, відбувається зміна механізму евтектичної кристалізації: замість кооперативного росту колоній відбувається незалежний ріст фаз, що складають евтектику, з формуванням структури тонкого конгломерату фаз.

4. У досліджених заевтектичних сплавах при певній концентрації боридів навколо них утворюються ободки складу твердого розчину бориду в металевій основі. Утворення ободків пояснюється тим, що атоми бориду, з рідини евтектичного складу, кристалізуються на поверхні надлишкових кристалів як на готовій підкладці, а твердий розчин бориду в металевій основі сплаву кристалізується незалежно, в області між гілками первинних боридів.

5. Ретельне дослідження тонкої структури кристалів у сплавах евтектичних систем на основі заліза та хрому з тугоплавкими боридами,дозволяє сформувати уявлення щодо механізму кристалізації та прогнозувати формування деяких структурно залежних властивостей цих сплавів, наприклад, механічних та триботехнічних.

Література

1. Коваленко В.С. Металлографические реактивы. Справочник. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1981. – 120 с.
2. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: МИСИС, 1999. – 416 с.
3. Таран Ю.Н., Мазур В.И. Структура эвтектических сплавов. Монография. – М.: Металлургия, 1978. – 312 с.
4. Справочник «Металловедение и термическая обработка стали». В 3-х томах. – Т. 2 «Основы термической обработки». Строение сплавов железо-углерод. / Ю. Н. Таран-Жовнир. – М.: Металлургия. 1983. – 368 с.
5. Панарин В.Е. Строение и свойства сплавов железа с тугоплавкими боридами. Кандидатская диссертация на соискание ученой степени к.т.н. по специальности 05.16.01 – металловедение и термическая обработка металлов. – К.: ИМФ АН УССР,1980 – 200с.
6. Панарін В.Є., Катерленко В.В., Іващенко Є.В. Дослідження структури заевтектичних сплавів системи Fe-CrB_2 // Матеріали XI Міжнародної конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Фізико-матеріалознавчі дослідження та комп'ютерне конструювання матеріалів». – К.: НТУ «КПІ ім. І. Сікорського», 2018. – С. 72-73.
7. Панарин В.Е., Иващенко Е.В., Мангушева В.В., Нечипоренко В.И. Закономерности структурообразования в порошке эвтектического сплава на основе железа с фазами внедрения при распылении струей инертного газа. // Матеріали конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 7». – К.: НТУУ «КПІ», 2017.
8. Панарин В.Е. Структурные изменения в эвтектических сплавах железа, затвердевших с различными скоростями // Металловедение и обработка металлов. – 1997. – №1. – С. 20-25.
9. Шурин А.К., Барабаш О.М., Дмитриева Г.П., Панарин В.Е., Легкая Т.Н. Строение эвтектических псевдодвойных сплавов переходных металлов с фазами внедрения // Известия Академии наук СССР. Металлы. – 1974. – № 6. – С.183-187.

References

1. Kovalenko V.S. *Metallograficheskiye reaktivy. Spravochnik* (Metallographic reagents. Directory), Moskow: Metallurgiya, 1981, 120 p. [in Russian].
2. Kolachev B.A., Yelagin V.I., Livanov V.A. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka tsvetnykh metallov i splavov* (Metallurgy and heat treatment of non-ferrous metals and alloys), Moskow: MISIS, 1999, 416 p. [in Russian].
3. Taran Yu.N., Mazur V.I. *Struktura evtekticheskikh splavov* (The structure of eutectic alloys), Moskow: Metallurgiya, 1978, 312 p. [in Russian].

4. Taran-Zhovnir Yu.N. Spravochnik “Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka stali”, T. 2 “*Osnovy termicheskoy obrabotki*”. Stroyeniye splavov zhelezo-uglerod (Fundamentals of heat treatment.), Moskow: Metallurgiya. 1983, 368 p. [in Russian].
5. Panarin V.Ye. *Stroyeniye i svoystva splavov zheleza s tugoplavkimi boridami* (The structure and properties of iron alloys with refractory borides), Kandidatskaya dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni PhD po spetsialnosti 05.16.01 – metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov, Kiev: IMF AN USSR,1980, 200 p. [in Russian].
6. Panarin V.Ye., Katerlenko V.V., Ivashchenko Ye.V. *Doslidzhennya struktury zaevtektychnykh splaviv systemy Fe-CrB_2* (Investigation of the structure of the eutectic alloys of the Fe-CrB2 system), Proceedings of the XI International Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists “Physical and Materials Research and Computer-aided Design of Materials”, Kyiv: NTU «KPI im. I. Sikorskoho», 2018, pp.72-73 [in Ukrainian].
7. Panarin V.Ye., Ivashchenko Ye.V., Mangusheva V.V., Nechiporenko V.I. *Zakonomernosti strukturoobrazovaniya v poroshke evtekticheskogo splava na osnove zheleza s fazami vnedreniya pri raspylenii struyey inertnogo gaza* (Patterns of structure formation in a powder of an eutectic alloy based on iron with interstitial phases when sprayed with an inert gas stream), Materials of the conference “Materials for robots in extreme minds - 7”, Kyiv: NTUU «KPI», 2017 [in Russian].
8. Panarin V.Ye., *Metallovedeniye i obrabotka metallov*, 1997, No.1, pp. 20-25 [in Russian].
9. Shurin A.K., Barabash O.M., Dmitriyeva G.P., Panarin V.Ye., Legkaya T.N., Izvestiya Akademii nauk SSSR. Metally, 1974, No. 6, pp.183-187 [in Russian].

Одержано 25.11.19

В. Е. Панарин

Растровая электронная микроскопия при исследовании структур эвтектических сплавов железа и хрома с тугоплавкими боридами

Резюме

В работе проведен сравнительный анализ возможностей традиционного метода металлографического анализа структуры металлов и сплавов и топографического анализа поверхности сильно протравленных сплавов, из которых химическим методом удалено одну из составляющих (например, металлическую) структуры. Указываются потенциальные возможности растровой электронной микроскопии в режиме вторичных электронов благодаря высокому разрешению и глубине резкости. Показано, что применение обоих методов дополняет друг друга и существенно увеличивает информацию о реальной структуре кристаллов фаз, входящих в состав сплава. На примере исследованных сплавов на основе железа и хрома с тугоплавкими боридами продемонстрированы возможности сочетания обоих методов исследования структуры для раскрытия механизма кристаллизации сплавов эвтектических систем и прогнозирования их свойств. Из анализа структур литых сплавов рассмотренных эвтектических систем установлено изменение механизма кристаллизации, в зависимости от скорости охлаждения, с кооперативного роста составляющих эвтектики на независимый рост с формированием структуры тонкого

конгломерата фаз. Приводятся реальные формы эвтектических кристаллов боридов, их связь между собой в сплаве с образованием несущего каркаса боридных фаз в эвтектических колониях, что позволяет рассматривать такие эвтектики как композиционные материалы, а в дальнейшем, предсказывать их поведение в реальных условиях эксплуатации. Работа представляет интерес, как для разработчиков новых составов сплавов, так и для теории кристаллизации, а также для использования в учебном процессе в курсах по материаловедению.

Ключевые слова: структура сплавов, растровая электронная микроскопия, эвтектики, механизм кристаллизации.

V. E. Panarin

Scanning electron microscopy in the study of the structures of eutectic alloys of iron and chromium with refractory borides

Summary

A comparative analysis of the capabilities of the traditional method of metallographic analysis of the structure of metals and alloys and topographic analysis of the surface of deeply etched alloys is carried out, from which one of the components (for example, metal) of the structure has been removed by the chemical method. The potential capabilities of scanning electron microscopy in the secondary electron mode are indicated due to the high resolution and depth of field. It is shown that the application of both methods is complementary and significantly increases the information of the real structure of the phase crystals that make up the alloy. By the example of the investigated alloys on iron and chromium base with refractory borides, the possibilities of combining both structure research methods to reveal the crystallization mechanism of eutectic system alloys and predict their properties are demonstrated. From an analysis of the structures of cast alloys of the considered eutectic systems, it was found that the crystallization mechanism changes, depending on the cooling rate, from the cooperative growth of eutectic components to independent growth with the formation of a structure of a thin phase conglomerate. The real forms of eutectic boride crystals are given, their relationship to each other in the alloy with the formation of a supporting framework of boride phases in eutectic colonies, which allows us to consider such eutectics as composite materials, and in the future, to predict their behavior under real operating conditions. The work is of interest, both for developers of new alloy compositions, and for the theory of crystallization, as well as for use in the educational process in courses on materials science.

Key words: alloy structure, scanning electronic microscope, eutectic, crystallization mechanism.