

УДК 621.891

В. Є. ПАНАРИН<sup>1</sup>, В. Є. КАТЕРЛЕНКО<sup>1</sup>, М. В. КИДРАЧУК<sup>2</sup>, Є. В. КОРБУТ<sup>3</sup>,  
Є. П. КОСТЮК<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Україна

<sup>2</sup>Національний авіаційний університет, Україна

<sup>3</sup>Національний технічний університет України «КПІ», Україна

## ПРОГНОЗУВАННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЕВТЕКТИЧНИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА З ТУГОПЛАВКИМИ БОРИДАМИ

*У роботі розглянуто перспективність створення нових заевтектичних сплавів на основі заліза з тугоплавкими боридами на основі системи Fe-CrV<sub>2</sub> з точки зору сучасних уявлень трибології. Показано важливу роль структурного фактору та вказано шляхи формування дисперсної регулярної структури на прикладі електроіскрового покриття заевтектичним сплавом системи Fe-CrV<sub>2</sub>. Обґрунтовано можливість поширення отриманих результатів на більш широке коло заевтектичних квазіподвійних сплавів на основі заліза з фазами втілення.*

**Ключові слова:** заевтектичні сплави, подрібнення первинних кристалів, фази втілення, перехідні метали, триботехнічні властивості.

**Вступ.** При створенні нових триботехнічних сплавів необхідно враховувати не лише їх хімічний та фазовий склад, кількість та властивості складових, але й структурний фактор, тобто форму та розміри кристалів фаз, їх розташування в просторі, регулярність чатування, здатність до дисипації локальної енергії, тощо. Одним з найбільш перспективних класів триботехнічних матеріалів є евтектичні сплави на основі перехідних металів з фазами втілення. У ряді робіт [1-4] було показано, що завдяки особливостям структури цих сплавів, яка формується в процесі кристалізації з рідкого стану, евтектична колонія являє собою природний композит, що складається із зміцнюючого каркасу з фаз втілення та м'якої металеві матриці – твердого розчину на основі заліза. В умовах локальних деформацій, які виникають в процесі тертя, напруження в основному сприймаються сильно розвиненим монокристалічним каркасом фаз втілення, а металева матриця передає та перерозподіляє напруження між окремими гілками зміцнюючого каркасу. Таким чином евтектична колонія ефективно розсіює локальну енергію, що виникає в процесі тертя і надає сплаву високої зносостійкості. При цьому, сумарний знос тари тертя з цілим рядом контртіл різної природи та в широких діапазонах параметрів тертя, лишається доволі низьким.

Загальний рівень триботехнічних характеристик евтектичного сплаву будь якої системи визначається структурою та складом, який у свою чергу, залежить від взаємодії електронних оболонок атомів компонентів, що утворюють евтектику, і не може бути змінений за своїм складом.

**Стан проблеми.** У роботах [2, 5] було узагальнено відомі та власні експериментальні дослідження фазових рівноваг квазіподвійних систем на основі перехідних металів з фазами втілення. Було встановлено таку закономірність: при переході від нітридних фаз втілення до карбідів та боридів склад евтектичних сплавів зміщується в бік тугоплавкого компоненту тобто фази втілення. Якщо для нітридвміщуючих систем

максимальна кількість зміцнюючої фази складає ~3-5% то для боридних систем вона може сягати ~7 – 12 %. Такий склад евтектик, в основному, визначає їх властивості. Нітридвміщуючі евтектики мають переважно високі міцності властивості, особливо при підвищених температурах, але низькі триботехнічні характеристики через відносно невелику кількість нітридів в евтектиці. У карбідвміщуючих системах, поряд з високою міцністю, спостерігається підвищення зносостійкості у порівнянні з нітридвміщуючими системами, що сягає максимальних значень для боридвміщуючих евтектичних систем, які є найбільш перспективними для розробки зносостійких матеріалів. З точки зору трибології слід очікувати ще кращих показників трибохарактеристик евтектичних сплавів при подальшому збільшенні вмісту в них боридів, але при цьому структура сплаву змінюється – починають виділятися первинні кристали боридів, що призводить до порушення регулярності чатування кристалів, їх огрублення (збільшення розмірів) і, як наслідок, зниження зносостійкості [6]. Тому на сьогоднішній день дослідники обмежуються розробкою сплавів в евтектичній області, задовольняючись основними природними властивостями, які їм притаманні.

**Основна ідея дослідження.** У тридцятих роках минулого сторіччя відомим вченим в області металургії М.С. Курнаковим на основі аналізу власних та літературних даних було встановлено закон, що визначав залежність властивостей сплавів евтектичних систем від їх фазового складу. На рис. 1 показано загальну залежність властивостей подвійних сплавів евтектичних систем від складу, яка може мати підвищені значення в області евтектики у порівнянні із утворюючими компонентами.

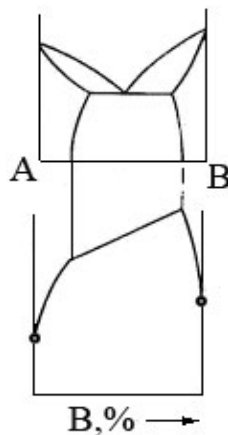


Рис. 1. Залежність властивостей від типу діаграми станів для систем з евтектикою

Така поведінка зміни властивостей пояснювалася М. С. Курнаковим структурним ефектом. У доевтектичних сплавах, в процесі кристалізації у переохолодженій рідині, спочатку утворюються первинні кристали на основі компоненту А (для наших квазіподвійних систем, що розглядаються, це будуть перехідні метали). При подальшому охолодженні рідина, що лишилася між первинними кристалами фаз втілення при досягненні температури кристалізації евтектики перетворюється на суміш фаз. При цьому, евтектична колонія, за сучасними уявленнями [7], являє собою два сильно розгалужених монокристала з яких один є базовим і ведучим евтектичну кристалізацію, а другий відомим,

він заповнює простір між гілками ведучого кристалізацію компоненту. По мірі наближення до евтектичного сплаву розмір первинних кристалів зменшується, регулярність чатування структури збільшується, завдяки чому властивості, особливо механічні, зростають. Найбільш регулярно за структурою та дисперсною за розмірами евтектичних кристалів є евтектика, що визначає екстремум її властивостей у порівнянні із до- та заевтектичними сплавами.

При переході у заевтектичну область структура знову огрублюється завдяки появі первинних кристалів другої фази (у нашому випадку – фази втілення), що знову таки зменшує механічні та триботехнічні властивості.

Слід зазначити, що наведені міркування з визначальним впливом структури на властивості зроблено М.С. Курнаковим на литих, тобто досить рівноважних сплавах, коли евтектична кристалізація проходить в умовах досить повного протікання дифузійних процесів. Яким чином обмеження дифузії компонентів евтектики буде впливати на формування властивостей М.С. Курнаковим не досліджувалося. Було лише зазначено, що збільшення швидкості охолодження сплавів призводить до підвищення деяких властивостей. Тоді ще не було створено методів надшвидкого охолодження, а максимальні швидкості сягали сотень градусів на секунду, які досягалися звичним гартуванням у воду або розчини солей.

У подальших дослідженнях із визначенням впливу швидкості охолодження на формування структури та складу евтектики [7] було встановлено, що обмеження дифузійної рухомості атомів перед фронтом кристалізації призводить до зсуву евтектичної точки у бік більш тугоплавкого компоненту і, одночасно, до зниження температури кристалізації евтектики. Таким чином, область кооперативного росту евтектичних кристалів поширювалася у бік більш тугоплавкого компоненту. Треба зазначити, що цей зсув області кооперативного росту по концентрації і температурі був незначним, що не могло суттєво вплинути на триботехнічні властивості швидко охолодженого сплаву у порівнянні із звичними швидкостями охолодження.

За уявленнями авторів роботи більш перспективними напрямки розробки сплавів евтектичних систем є перехід у заевтектичну область із одночасним зменшенням розмірів первинних кристалів. Такий підхід дозволяє зберегти достатню дисперсність та регулярність структури і одночасно збільшити вміст зміцнюючої фази в сплаві. Подрібнення розмірів первинних кристалів можна здійснювати за рахунок або досягнення великих швидкостей охолодження, або модифікації структури шляхом введення дисперсних тугоплавких кристалів, що стають зародками формування фаз при кристалізації.

**Мета та завдання дослідження.** Метою роботи є визначення основних напрямків досліджень при створенні нових заевтектичних сплавів систем, вміщуючих евтектику на основі перехідних металів з фазами втілення, які б мали більш високі триботехнічні властивості ніж чисто евтектичні сплави тих же систем. Основним критерієм оцінки перспективності пропонуваного напрямку створення нових заевтектичних сплавів є дослідження їх структури в литому стані та кількісні порівняння із структурами чисто евтектичних сплавів.

**Об'єкти та методи досліджень.** У якості об'єктів дослідження було обрано литі сплави квазіподвійної системи Fe-CrB<sub>2</sub> евтектичного типу, яка є відповідним політермічним перетином потрійної системи Fe-Cr-B [8]. Сплави із вмістом CrB<sub>2</sub> (ваг.%): 2,5 (доевтектичний), 7,5 евтектичний та 11 (заевтектичний) виготовлено у вакуумній дуговій печі на мідному

водоохолоджуваному поді невитратним вольфрамовим електродом в атмосфері аргону. Швидкість охолодження сплавів знаходилася на рівні  $10^2$  °C.

Із зливоків вагою 40гр вирізалися електроди розміром 2x2x30мм для нанесення покриттів електроіскровим методом. Оскільки метод електроіскрового легування [9] дозволяє реалізувати в покритті швидкості охолодження порядку  $10^4$  °C, це дозволило зменшити дифузійну рухомість атомів перед фронтом кристалізації у порівнянні з литим станом, і тим самим подрібнити структуру.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Структурні дослідження виконано на растровому електронному мікроскопі в режимі вторинних електронів. Кількісну обробку зображень структури виконано із застосуванням програми Image-Pro.

На рис.2, *a* представлено структуру евтектичних кристалів  $\text{CrB}_2$ , в системі сплавів  $\text{Fe-CrB}_2$ , які являють собою пласкі кристали А з середньою товщиною (*h*) в одиниці мікрон. Оскільки залізню матрицю сплаву витравлено, то на РЕМ зображенні місце, де вона була розташована, виглядає як порожнеча (В).

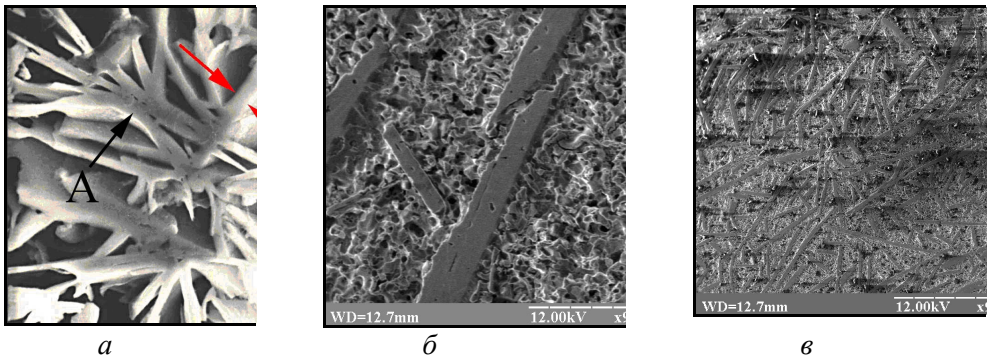


Рис. 2. Структура евтектичних кристалів  $\text{CrB}_2$  в системі  $\text{Fe-CrB}_2$  (*a*), первинних кристалів в литому сплаві із вмістом  $\text{CrB}_2$  11ваг.% (*б*), та первинних кристалів в електроіскровому покритті із того самого заевтектичного сплаву (*в*). РЕМ

У заевтектичному сплаві з 11ваг.%  $\text{CrB}_2$  в литому стані первинні кристали  $\text{CrB}_2$  мають великі розміри: товщина – десятки, а довжина – сотні мікрон (за результатами комп'ютерної обробки зображень в програмі Eimage-Pro). При збільшенні швидкості охолодження на два порядки, у електроіскровому покритті, первинні кристали того ж самого сплаву зменшуються – товщина становить одиниці, а довжина десятки мікрон. Розміри евтектичних кристалів також зменшуються через збільшення кількості базових кристалів, з яких починається зародження евтектичних колоній.

Слід зазначити, що збільшення швидкості охолодження суттєво не зменшує співвідношення між розмірами первинних та евтектичних кристалів в литому стані та в покритті. Але загальна диспергація структури, тобто зменшення розмірів як евтектичних так і заевтектичних кристалів позитивно відбивається на зберіганні властивостей на високому рівні, в тому числі триботехнічних. Можна очікувати, що збільшення вмісту зміцнюючої фази у заевтектичних сплавах системи  $\text{Fe-CrB}_2$  з 7,5 до 11 ваг.% та одночасним подрібненням розмірів як евтектичних так і заевтектичних кристалів, відповідно до сучасних уявлень трибології, призведе до підвищення зносостійкості у порівнянні з чисто евтектичними сплавами тієї ж системи. Цей прогноз можна поширити на

боридвміщуючі евтектичні системи на основі перехідних металів, які являють собою політермічні перетини відповідних потрійних систем, оскільки між ними не існує принципових відмінностей з точки зору формування оптимальної структури для досягнення високої зносостійкості. У заевтектичних сплавах таких систем механізм кристалізації, тобто формування структури, однотипний – фази втілення формують зміцнюючий каркас, який сприймає основне навантаження при деформації в зоні тертя, і це обумовлює високі триботехнічні характеристики.

#### Висновки:

1. Досліджено структурні зміни в заевтектичному сплаві квазіподвійної системи Fe-CrB<sub>2</sub> в електроіскровому покритті у порівнянні з литим сплавом того ж складу. Показано, що збільшення швидкості охолодження, яке досягається в електроіскровому покритті з 10<sup>2</sup> °C до 10<sup>4</sup> °C, призводить до диспергації як евтектичних так і первинних кристалів фази втілення CrB<sub>2</sub>.

2. Прогнозується підвищення триботехнічних характеристик (зокрема зносостійкості) дослідженого заевтектичного сплаву при збільшенні швидкості охолодження у порівнянні з литим станом, завдяки збільшенню кількості зміцнюючої фази та зменшенню розмірів кристалів.

3. Обґрунтовується правомірність перенесення отриманих результатів, щодо диспергації структури і підвищення триботехнічних властивостей досліджених сплавів, на більш широкий круг сплавів квазіподвійних заевтектичних систем на основі перехідних металів з фазами втілення.

#### Список літератури

1. Шурин А. К. Фазовые равновесия и структура сплавов Fe-TiB<sub>2</sub>, Fe-ZrB<sub>2</sub> и Fe-HfB<sub>2</sub> / А. К. Шурин, В. Е. Панарин // Известия Академии наук СССР. Металлы. – 1974. №5. – С. 235 – 239.
2. Шурин А. К. Строение эвтектических псевдодвойных сплавов переходных металлов с фазами внедрения / А. К. Шурин, О. М. Барабаш, Г. П. Дмитриева, В. Е. Панарин, Т. Н. Легкая // Известия Академии наук СССР. Металлы. – 1974. №6. – С. 183. – 187.
3. Шурин А. К. Диаграммы состояний и структура сплавов квазибинарных систем Cr-ZrB<sub>2</sub> и Cr-HfB<sub>2</sub> / А. К. Шурин, В. Е. Панарин // Доклады Академии наук Украинской ССР. Серия «А», Физико-математические и технические науки. – 1975. №1. – С. 87 – 90.
4. Шурин А. К. Износостойкость нержавеющей эвтектических сплавов с фазами внедрения / А. К. Шурин, В. Е. Панарин, М. В. Киндрачук // Проблемы трения и изнашивания. – 1981. – №19. – С. 65 – 73.
5. Шурин А. К. Некоторые общие закономерности тройных диаграмм состояния металлов с бором / А. К. Шурин, В. Е. Панарин // Металлофизика. – 1976. – №66. – С. 85 – 91.
6. Шурин А. К. Диаграммы состояния железа с фазами внедрения как основа разработки износостойких эвтектических сталей / А. К. Шурин, В. Е. Панарин // МиТОМ. – 1984. – №2. – С. 55. – 57.
7. Таран Ю. Н. Структура эвтектических сплавов / Ю. Н. Таран, В. И. Мазур. – М.: Металлургия, 1978. – 311 с.
8. Кузьма Ю. Б. Исследование по кристаллохимии боридов : дис. ... доктора хим. наук: / Кузьма Ю. Б. Львовский государственный университет. - Львов, 1973. - 375 с.
9. Золотых Б. Н. О физической природе электроискровой обработки металлов. В кн. Электроискровая обработка металлов / Б. Н. Золотых // Выпуск 1. Изд-во АН СССР. М. – 1957. – С. 38 – 69.

*V. Ye. PANARIN, V. Ye. KATERLENKO, M. V. KINDRACHUK, Ye. V. KORBUT,  
Ye. P. KOSTYUK*

### **TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS PREDICTION HYPEREUTECTIC IRON-BASED ALLOYS WITH REFRACTORY BORIDES**

In the work prospect to creation of new hypereutectic alloys on the iron basis with refractory borides on the basis Fe-CrB<sub>2</sub> system from the point of view modern representations tribology is considered. The important role of a structure factor is shown and paths to formation disperse regular structure on an example an electrospark coating are specified by a hypereutectic alloy of Fe-CrB<sub>2</sub> system. Possibility to dilating of the obtained results on more wide range hypereutectic quasibinary alloys on an iron basis with interstitial phases is proved.

**Keywords:** hypereutectic alloys, crushing primary crystals, interstitial phases, transitive metals, tribotechnical properties.

**Панарін Валентин Євгенович** – д-р техн. наук, старший науковий співробітник, Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, бул. Академіка Вернадського, 36, м. Київ, Україна, 03680, E-mail: skywork@imp.kiev.ua.

**Катерленко Володимир Євгенович** – провідний інженер, Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, бул. Академіка Вернадського, 36, м. Київ, Україна, 03680.

**Кіндрачук Мирослав Васильович** – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри машинознавства, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел./факс: +38 044 406 77 73, E-mail: Kindrachuk@ukr.net.

**Корбут Євген Валентинович** – канд. техн. наук, доцент кафедри, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», вул. Борщагівська, 115, м. Київ, Україна, 03056, тел.: +38 044 454 95 28, E-mail: korbut1@online.ua.

**Костюк Євгеній Павлович** – студент, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел./факс: +38 044 406 77 73.