

Тенденції створення і додаткового легування зносостійких матеріалів на основі системи Fe – Cr – C (огляд)

В. А. Маслюк, доктор технічних наук

Є. С. Караїмчук

А. А. Бондар, доктор хімічних наук

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

Проведено огляд вітчизняних і зарубіжних робіт щодо отримання і вдосконалення шляхом додаткового легування структури та властивостей матеріалів на основі залізохромвуглецевих сплавів. Розглянуто ефективність використання добавок металів, тугоплавких сполук та РЗМ для легування та модифікування матеріалів на основі хромистих сталей і чавунів з метою керування їх структурним станом і підвищення фізико-механічних, фізико-хімічних, триботехнічних та експлуатаційних властивостей.

Залізохромвуглецеві сплави широко використовуються для виготовлення виробів, що експлуатуються за умов одночасної дії сил тертя, абразивного, корозійного і ерозійного зношування [1]. Проте вони не завжди забезпечують необхідний ресурс роботи і надійність експлуатації деталей з них.

Гетерогенні Fe – Cr – C сплави відзначаються суттєвою відмінністю властивостей структурних складових – карбідної і металевої фаз щодо їх твердості, міцності, здатності до пластичної деформації, опору руйнування. Змінюючи фазовий склад і гетерогенність структури можна шляхом легування і модифікування одержувати в структурі залізохромистих сплавів додаткові виділення твердих або м'яких включень. Такі тверді включення можуть різко підвищувати абразивну стійкість, а м'які – антифрикційні властивості сплавів.

Враховуючи це в роботі зроблено аналіз доступних літературних даних стосовно сучасних напрямків вдосконалення високовуглецевих залізохромистих сплавів і наплавок з них.

Незважаючи на те, що система Fe – Cr – C досліджується вже більше століття, вона і сьогодні цікавить учених і практиків [2].

Ізотермічний переріз діаграми стану системи при 700 °С добре ілюструє фазові рівноваги в області розпаду γ -фази і карбиду $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$ (рис. 1).

Як видно з рис. 1, перспективні для досліджень складі сплавів (позначені точками) знаходяться у досить широкій двофазній області (α , γ) Fe – $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$, і можуть бути використані для створення зносостійких матеріалів.

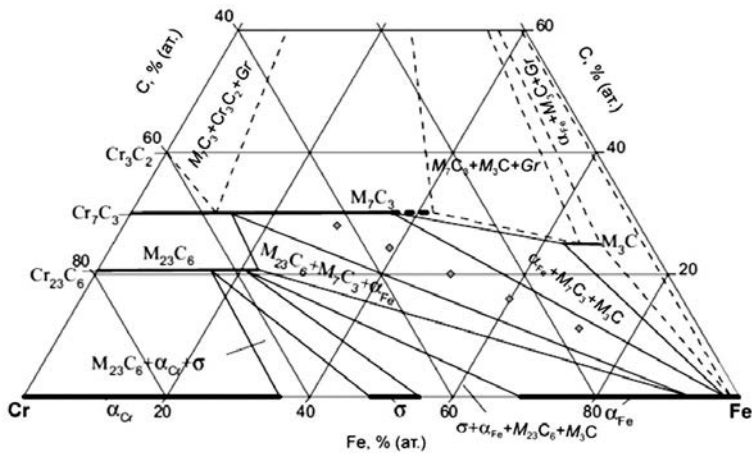


Рис. 1. Ізотермічний переріз діаграми стану системи Fe – Cr – C при 700 °C [2].

Система Fe – Cr – C містить карбіди, такі як $M_{23}C_6$, M_7C_3 і M_3C_2 , що знаходяться в рівновазі як з аустенітом, так і з феритом, тоді як карбіди M_3C_2 і M_7C_3 знаходяться в рівновазі тільки з аустенітом.

Заевтектичний сплав Fe – Cr – C є типовим зносостійким матеріалом. Його висока зносостійкість тісно пов'язана з утворенням складних карбідів перехідних металів, типу M_7C_3 . Встановлено, що масова частка первинних карбідів M_7C_3 збільшується зі збільшенням вмісту C. При цьому відповідно підвищується зносостійкість. Також показано, що орієнтація первинного карбіду M_7C_3 щодо робочої поверхні виробу також може впливати на зносостійкість евтектичного сплаву Fe – Cr – C. Встановлено, що більш дисперсні карбіди M_7C_3 за умов швидкого охолодження під час кристалізації можуть збільшити твердість евтектичного сплаву [3].

Зносостійкі матеріали цієї системи умовно можна розділити на литі, наплавочні та порошкові.

Однією із фундаментальних праць, спрямованих на створення нових литих зносостійких сплавів для роботи в умовах тертя, ерозії і корозії, є робота [4], в якій В. І. Тихоновичем показано, що легування сплаву 130X15, з вихідною аустенітною структурою молібденом, вольфрамом, ванадієм, ніобієм зумовлює значне підвищення зносостійкості в умовах тертя ковзанням. Легування молібденом і ванадієм призводить до перетворення M_7C_3 в $M_{23}C_6$ при термічній обробці і утворенню карбіду M_6C та інтерметаліду $Fe_{36}Cr_{10}Mo_{12}$. Максимальну зносостійкість, мають сплави, в структурі яких переважають карбіди $M_{23}C_6$.

Встановлено, що при легуванні марганцем, нікелем, міддю, які розширюють γ -область, максимум зносостійкості досягається, коли в контактній зоні тертя реалізується $\gamma \leftrightarrow \alpha$ перетворення і при цьому встановлюється оптимальне співвідношення 50:50 γ і α фаз. Також показано, що використання мартенситного перетворення, як механізму зміцнення і одночасно релаксації напружень в приповерхневих шарах матеріалів при

терті, є перспективним напрямком. При визначенні впливу легуючих елементів встановлено, що високій зносостійкості відповідає підвищений вміст хрому у зовнішньому шарі контактної зони і рівномірне зниження твердості при переході до вихідної структури.

Дослідження впливу модифікуючих добавок на структуру, властивості та зносостійкість Fe – Cr – C сплавів показало, що введення добавок РЗМ підвищує дисперсність металевої матриці, сприяє руйнуванню сітки евтектичних карбідів і сфероїдизації і коагуляції карбідної фази. Локалізуючись на границях зерен поверхневоактивні елементи (церій, ітрій, неодим) суттєво впливають не тільки на процеси первинної і вторинної кристалізації, але і на перерозподіл легуючих елементів в деформованих тертях поверхневих шарів металу, зокрема, спостерігається підвищений вміст зміцненого аустеніту. Модифіковані хромисті сталі і чавуни мають більш високі міцність, пластичність і корозійну стійкість.

В подальших дослідженнях, присвячених формуванню зносостійких структур хромистих сталей і чавунів, встановлено, що введення в промислові хромисті сталі (12X18H9T, 12X17, 20X13) додаткових зміцнюючих фаз з підвищеною енергією руйнування, призводить до утворення евтектик при порівняно малому вмісті їх у евтектиці (12 – 15 % об.). З'ясовано, що інтенсивність зношування та коефіцієнт тертя сплавів системи Fe – Cr – C у квазібінарному розрізі Fe – Me Me_7C_3 (Cr/C=10) набувають мінімальних значень саме при евтектичному або наближених до нього складів сплавів. У сплавах системи Fe – Cr – C бажано, щоб карбідна складова розташовувалась у вигляді відокремлених включень, а матриця була додатково зміцнена за рахунок вторинних карбідів. Для умов абразивного зношування бажано не прагнути досягти максимальної твердості, а забезпечити підвищений вміст (>50 %) метастабільного аустеніту, який під дією деформації перетвориться в мартенсит на робочій поверхні.

Ряд робіт присвячено впливу сильних карбідоутворюючих металів (титан, ванадій, ніобій, вольфрам, молібден) на структуру, фізико-механічні, триботехнічні властивості сплавів системи Fe – Cr – C та наплавків з них. Так в роботі [5] досліджено вплив добавок титану на мікроструктуру та властивості виливків із хромистого білого чавуну (16 % Cr, 2,5 % C), з метою підвищення їх зносостійкості. Встановлено, що добавки титану зменшують розмір зерна аустеніту, дещо знижують об'ємний вміст карбідів Me_7C_3 , суттєво підвищують мікротвердість матриці (рис. 2 а), загальну твердість чавуну і не впливають на тріщиностійкість. Показано, що при легуванні чавуну 2 % Ti за рахунок взаємодії з вуглецем утворюється до 3 % об. карбіду титану TiC, що приводить до зростання твердості сплаву від 50 до 60 HRC (рис. 2 б).

Переважає кількість робіт, опублікованих за рубежом, присвячена нанесенню на сталеву поверхню зносостійких шарів зі сплавів системи Fe – Cr – C методами електродугового наплавлення та наплавлення порошковим дротом. В роботі [6] досліджено вплив добавок ніобію в кількості 6,03 – 6,12 % і по 0,2 % ванадію і вольфраму на формування

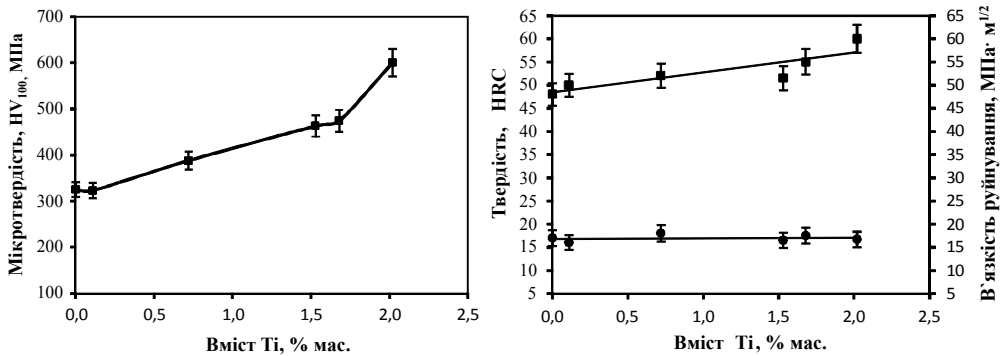


Рис. 2. Залежність мікротвердості матриці (а) та твердості і в'язкості руйнування (б) білого хромистого чавуну від вмісту титану. ● – в'язкість руйнування, ■ – твердість.

мікроструктури, механічні властивості і абразивну стійкість багат шарових наплавів із високохромистих чавунів.

Встановлено, що при додаванні близько 6 % ніобію за рахунок утворення карбідів з високою мікротвердістю зростає загальна твердість і підвищується зносостійкість наплавленого шару. Додатки вольфраму і ванадію в кількості 0,21 % кожного зміцнюють як матрицю так і карбідні фази і дещо підвищують твердість і зносостійкість поверхневого шару. Збільшення вмісту вольфраму і ванадію понад 0,21 % хоча і призводить до зростання твердості, практично не впливає на абразивну стійкість наплавів.

Показано [7], що додатки ферованадію в кількості 1,5 – 3,0 % мас. введеного у порошковий дріт (25 – 30 % Cr і 3,5 – 4,0 % C) призводять до підвищення абразивної стійкості наплавленого шару в 2,5 рази (рис. 3). Оптимальний вміст додатки складає 2,0 – 2,5 % мас. Автори вважають, що при охолодженні зразка утворюються первинні карбіди гексагональної форми, тоді як вторинні карбіди кристалізуються у формі видовжених стрижнів і дрібних включень сферичної форми. Вони відносять їх до карбідів типу Me_7C_3 .

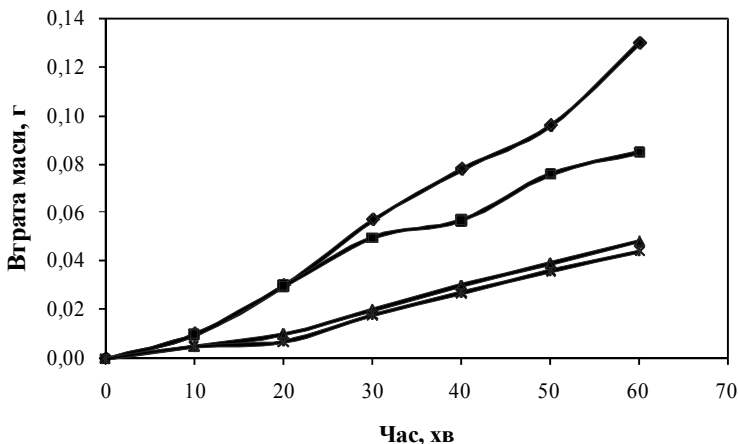


Рис. 3. Вплив тривалості випробувань на втрату маси наплавленого шару з різним вмістом ферованадію в сплаві.

Структура, зношування, руйнування

Зі збільшенням кількості добавки ванадію мікроструктура наплавленого шару подрібнюється. Це вказує на те, що добавки ферованадію проявляють себе, як інгібітори росту зерен наплавлених покриттів. На жаль, в роботі не наведено тип вторинних карбідів ванадію, що не дозволяє встановити кінцевий фазовий склад покриттів.

Досліджено [8] вплив добавок титану (0,28; 0,63 і 1,17 % мас.), введеного у вигляді феротитану в порошок дріт, що містив 25 % ферохрому, 3 % феромарганцю, 3 % феросиліцію, решта – залізо на мікроструктуру і абразивну стійкість наплавки на сталь (ASTM1045). Встановлено, що зі збільшенням вмісту титану до 0,63 % мас. твердість тврдосплавного шару зростає від 58 до 61 HRC, що підвищує абразивну стійкість наплавки. Підвищення вмісту титану до 1,17 % мас., в результаті перебудови мікроструктури Fe – Cr – C сплаву від заевтектичної на доевтектичну, знижує твердість до 55 HRC і відповідно погіршує зносостійкість наплавки. Карбіди типу $(Cr, Fe)_7C_3$ із збільшенням вмісту титану і утворенням частинок TiC змінюють форму і стають більш дисперсними.

В роботі [9] вивчено вплив добавок TiB_2 (2 % мас.) і 1,3 та 5 % мас. Nb на мікроструктуру і стійкість проти абразивного зношування наплавки із ширококовживаного порошкового дроту зі сплаву Fe – Cr – C (M-1). Хімічний склад твердих наплавки наведено в табл. 1. Наплавки здійснювали за допомогою зварювального апарату на підкладці із маловуглецевої сталі, з нанесенням чотирьох послідовних шарів.

Таблиця 1

Хімічний склад твердих наплавки із високохромистих чавунів, вміст елементів в % мас.

Склад наплавки	C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	B	Nb
M-1	5,90	1,82	0,63	30,98	0,15			
M-2	5,56	1,89	0,58	31,38	0,16	0,56	0,24	
M-3	5,56	1,93	0,65	29,25	0,12	0,57	0,25	0,85
M-4	5,53	0,90	0,60	26,40	0,16	0,52	0,20	2,45
M-5	5,03	1,70	0,67	26,65	0,17	0,62	0,25	4,57

Рентгенофазовим аналізом встановлено, що при додаванні TiB_2 у залізохромвуглецевому сплаві утворюється нова тверда фаза TiC, а при одночасному введенні TiB_2 і Nb з'являється тверда композитна фаза TiC – NbC. Відповідно зростає мікротвердість матриці, проте це практично не впливає на загальну твердість наплавленого сплаву. Легування добавками TiB_2 та Nb також приводить до зменшення розміру карбідів типу M_7C_3 та підвищення зносостійкості наплавки в 7,5 разів (рис. 4).

Таким чином армування (зміцнення) металевої матриці виділеннями складної твердої фази TiC – NbC сприяє утворенню дрібнозернистої структури і суттєво підвищує стійкість до абразивного зношування наплавки із високохромистих чавунів.



Рис. 4. Вплив складу наплавки на втрату її маси при абразивному зношуванні.

Авторами роботи [10] досліджено вплив добавок порошків феробору і ферохрому до зварювального дроту зі сталі AISI1020 на твердість і зносостійкість наплавки при сухому терті по шкурці із SiC. Методом відкритого електродугового зварювання з використанням масивного дроту і додаванням різної кількості порошкової суміші феробору і ферохрому було досліджено п'ять варіантів наплавки, кількість добавок феросплавів в яких наведено в табл. 2.

Таблиця 2
Склад феросплавних порошкових сумішей

Зразок	FeB	FeCr	Вміст феросплавів у наплавці, % мас.
A		100	50,0
B	10	90	47,5
C	20	80	48,0
D	30	70	48,2
E	100		49,2

Випробування наплавлених шарів показали, що максимальну твердість (73 HRC) мають покриття складу (30 % дріт – 70 % (30 % FeB – 70 % FeCr)), а найвищу стійкість проти абразивного зношування мав шар, наплавлений з використанням 100 % FeB (рис. 5).

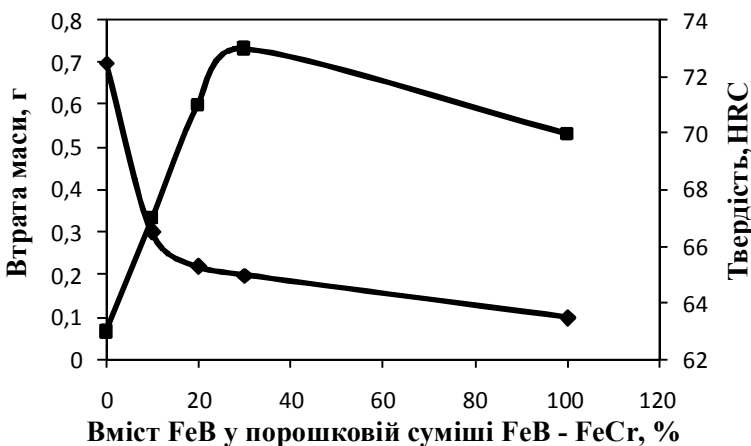


Рис. 5. Вплив кількості феробору в шихті на зносостійкість і твердість наплавлених шарів. ◆ – зносостійкість, ■ – твердість.

Це пояснюється утворенням складних боридів і карбоборидів заліза (FeB , Fe_2B , $\text{Fe}_{23}(\text{C}, \text{B})_6$, $\text{Fe}_3\text{B}_{0,7}\text{C}_{0,3}$) і збільшенням об'ємного вмісту твердих фаз, підвищуючих загальну твердість і абразивну стійкість наплавки. Зазначається, що боридні і карбоборидні фази фіксуються лише у наплавленому шарі складу (E), в якому вихідний вміст феробору складав 100 %.

За останні десятиліття значна увага приділяється дослідженням впливу ультрадисперсних (нанорозмірних) тугоплавких сполук TiCN , SiC , TiN , WC , Al_2O_3 як інокулюючих, модифікуючих добавок, на формування мікроструктури, фізико-механічних та триботехнічних властивостей сталей і сплавів. Показано [11], що застосування ультрадисперсних модифікаторів призводить до зменшення розміру зерна в сталях у 2,5 – 3,0 рази, диспергує кристали карбідів в хромистих чавунах із заевтектичною структурою, забезпечує формування і збереження в литій структурі сплавів після термічної обробки регулярних наноструктурних включень зміцнюючих фаз, підвищує межу міцності на згин хромистих чавунів до 900 МПа і їх абразивну стійкість на 30 – 50 %.

Залізохромвуглецеві матеріали і вироби із них успішно отримують також за технологією порошкової металургії – твердофазним або рідкофазним спіканням порошкових композицій.

Одна із перших спроб створення таких матеріалів була здійснена в роботі [12], в якій для цього використали суміш порошоків заліза (65 %), білого чавуну (25 %) і хромистої сталі Х30 (10 %). Спіканням за режимом, що не приводив до гомогенізації складу, була отримана порошкова зносостійка сталь ЖЧ25Х3. В умовах граничного тертя по контртілду зі швидкоріжучої сталі Р18, швидкості ковзання 2,5 м/с і навантаження 3,4 МПа, змащенні веретенним маслом темп зношування сталі ЖЧ25Х3 складав всього 0,056 мкм/км проти 0,240 мкм/км для литої сталі ШХ15. Це забезпечило збільшення ресурсу деталей масляного насоса в 6 разів порівняно зі сталлю ШХ15. До числа порошкових зносостійких матеріалів на основі системи $\text{Fe} - \text{Cr} - \text{C}$ відносяться також сплави $\text{Fe} - \text{Cr}_3\text{C}_2$. Встановлено [13], що збільшення вмісту заліза в шихті від 40 до 85 % мас. призводить до підвищення границі міцності на згин від 600 до 1900 МПа, ударної в'язкості від 10 до 110 кДж/м², абразивної стійкості від 0,253 до 0,460 км/мм і зниженні твердості від 57 до 45 НРС. Оптимальним поєднанням фізико-механічних і триботехнічних властивостей володіють сплави на основі заліза з 25 – 30 % Cr_3C_2 . В подальших дослідженнях, [14] замість Cr_3C_2 для створення порошкових залізохромвуглецевих матеріалів було запропоновано використання високовуглецевого ферохрому ФХ800 промислового виробництва. Суттєвими перевагами ФХ800 є його недефіцитність, низька вартість і підвищена крихкість, що дозволяє досить просто отримувати з нього порошок методом механічного подрібнення. Досліджено вплив вмісту ферохрому ФХ800 в кількості 10, 22, 30 і 35 % мас. в шихті на основі залізного порошку на технологічні, фізико – механічні та триботехнічні властивості спечених при оптимальних температурах матеріалів (табл. 3).

Структура, зношування, руйнування

Таблиця 3

Властивості порошкових матеріалів на основі заліза з різним вмістом високовуглецевого ферохрому ФХ800

Склад матеріалів, %	Об'ємна усадка, %	Міцність на згин, МПа	Твердість, HRC	Зношування, мг/км	Коефіцієнт тертя
90 % Fe - 10 % ФХ800	10,20	1246,2	15	80,5	0,35
78 % Fe - 22 % ФХ800	17,43	976,9	28	10,2	0,36
70 % Fe - 30 % ФХ800	22,20	1316,0	35	7,8	0,16
65 % Fe - 35 % ФХ800	36,10	1760,0	52	4,8	0,15

Показано, що найбільш вдале поєднання фізико-механічних та триботехнічних властивостей спостерігається для матеріалу 65 % Fe – 35 % ФХ800. Це вказує на економічну доцільність, перспективність заміни дорогого і дефіцитного карбиду хрому Cr_3C_2 на дешевий і широкоживаний високовуглецевий ферохром ФХ800 при створенні порошкових зносостійких матеріалів типу хромистих карбідосталей.

Підсумовуючи, можна зробити наступні узагальнення і рекомендації.

Розробку зносостійких залізохромвуглецевих матеріалів доцільно здійснювати на базі хромистих сталей ($Cr > 12\%$), забезпечуючи утворення зміцнюючих фаз типу Me_7C_3 і $Me_{23}C_6$, використовуючи для цього сплави евтектичного, або наближеного до нього складів.

До складу хромистих сталей і чавунів перспективно додатково вводити сильні карбідо- і боридоутворюючі елементи (титан, ванадій, ніобій, молібден, вольфрам), які забезпечують утворення спеціальних карбоборидів і перерозподіл хрому між твердою фазою і металевою матрицею. Найбільшої уваги заслуговує титан, введення якого у вигляді феротитану та бориду титану TiB_2 спільно з ніобієм, за рахунок утворення складного карбиду титану – ніобію, армуючи матрицю, підвищує абразивну стійкість наплавленого шару до 7,5 раз.

Серед феросплавів найбільш перспективними порошковими добавками є феротитан, феробор і ферохром. Вибір оптимальних складів добавок феросплавів необхідно проводити з урахуванням вимог до властивостей матеріалів і конкретних умов експлуатації виробів із них.

Перспективним на сьогодні вважається використання легуючих і модифікуючих добавок в ультрадисперсному стані (нанопорошки $TiCN$, TiN , SiC , WC , Al_2O_3 та ін.). Нанопорошки тугоплавких сполук лише в кількості 0,01 % об. окрім модифікуючої і інокулюючої дії ефективно впливають на якість відливок зі сталі і сплавів. На жаль широкому впровадженню нанопорошків в металургійне виробництво перешкоджає їх дороговизна, висока активність при зберіганні і транспортуванні.

При створенні зносостійких порошкових залізохромвуглецевих матеріалів необхідно враховувати більшість рекомендацій, які стосуються розробки і додаткового легування і модифікування хромистих сталей і чавунів металургійного виробництва. До них в першу чергу можна віднести використання в якості основи хромистих сплавів і легуючих добавок перехідних металів Періодичної системи (титан, молібден, ванадій, ніобій) та їх тугоплавких сполук в нанодисперсному стані.

Як джерела хрому і карбідної складової зносостійких матеріалів техніко-економічно доцільним є застосування високовуглецевого ферохрому типу ФХ800 промислового виробництва.

З метою підвищення фізико-механічних, триботехнічних і експлуатаційних властивостей порошкових матеріалів перспективно комплексне легування ультрадисперсними добавками без кисневих тугоплавких сполук і більш широке застосування сучасних методів термічної, термомеханічної і хіміко-термічної обробки.

Література

1. Тихонович В.И., Коваленко О.И., Локтионов В.А. Литые износостойкие материалы, их разработка и применение. – К.: Знание, 1980. – 142 с.
2. Bondar A. / Carbon – Chromium – Iron / A. Bondar, V. Ivanchenko, A. Kozlov, I.-C. Tedenac // Landolt – Börnstein, Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology / ed. by W. Martensen. - New Series. Group IV: Physical Chemistry. – Ternary Alloy Systems. Phase Diagrams, Crystallographic and Thermodynamic data Critically Evaluated by MSIT / ed. by G. Effenberg, S. Ilyenco. - Berlin, Heidelberg: Springer – Verlag, 2007. - Vol. 11D2. – P. 1 – 55.
3. Гарбер М. Е. Износостойкие белые чугуны / М. Е. Гарбер. – Москва: Машиностроение, 2010. – 279 с. – (2).
4. Тихонович В.И. Разработка новых литых износостойких железохромуглеродистых сплавов для машиностроения за счет управления их структурным состоянием: автореферат ... докт. техн. наук. – Киев. – 1993. – 35 с.
5. A. Bedolla-Jacuinde, R. Correa, J.G. Quezada, C. Maldonado. 2005. Effect of titanium on the as-cast microstructure of a 16% chromium white iron. *Materials Science and Engineering A* 398 (2005) 297 – 308.
6. Qingbao Wang and Xiaoyan Li. 2010. Effects of Nb, V, and W on microstructure and abrasion resistance of Fe – Cr – Chardfacing alloys. *Welding journal*. – S. 133.
7. Xiaowen Qi, Zhining Jia, Qingxiang Yang, Yulin Yang. 2011. Effects of vanadium additive on structure property and tribological performance of high chromium cast iron hardfacing metal. *Surface & Coatings Technology* 205 (2011) 5510 – 5514.
8. Y. F. Zhou, Y. L. Yang, D. Li, J. Yang. 2012. Effect of titanium content on microstructure and wear resistance of Fe – Cr – Chardfacing layers. *Welding Journal*. – S. 229.
9. Hai-yun Liu, Zhi-liang Song, Qing Cao. 2016. Microstructure and properties of Fe – Cr – C. Hardfacing alloys reinforced with TiC – NbC. *Journal of iron and steel research, International*. – S. 276 – 280.
10. Nilay Yöksel and Salim Sahin. 2014. Effects of ferroboration and ferrochromium powder addition on abrasive wear resistance of Fe-Based hardfacing coatings. *Mechanical testing and microstructural investigation* 56(2014).

11. Trotsan A. I. Modification of iron- carbon melts dispersible powders / A.I. Trotsan, I.L. Brodersky, V.V. Kaverinsky. – Saarbrucken: International Publishing Hous “LAP Lambert Academic Publishing. GmbH&Co KG, 2012. – 182 p.
12. Радомысельскі І.Д. Конструкцыйныя пылавковыя матэрыялы / І.Д. Радомысельскі, Г.Г. Сердюк, Н.І. Шэрбань.- К.: Тэхніка, 1985. –152 с.
13. Маслюк В.А. Спеканне, структуроафармаванне і ўласцівасці пылавковых матэрыялаў сістэмы карбід хрома – жалеза / В.А. Маслюк, В.Н. Кліменка, Ю.В. Самброс // Пылавковая металургія. – 1986. – №8. – С. 39 – 44.
14. Маслюк В.А. Структура та ўласцівасці пылавковых матэрыялаў кампазіцыі жалеза – высокавуглецевы фэрохром / В.А. Маслюк, А.А. Бондар, В.Б. Курась та ін. // Пылавковая металургія. – 2013. – №5/6. – С. 66 – 74.

References

1. Tihonovich, V.I., Kovalenko, O.I., Loktionov, V.A. (1980). Litye iznosostojkie materialy, ih razrabotka i primenenie [Molded wear-resistant materials, their development and application]. Kyiv: Znanie.
2. Bondar A. / Carbon – Chromium – Iron / A.Bondar, V.Ivanchenko, A.Kozlov, I.-C. Tedenac // Landolt – Bürnstein, Numerical Date and Functional Relationships in Science and Technology / ed. by W.Martinsen. - New Series. Group IV: Physical Chemistry. – Ternary Alloy Systems. Phase Diagrams, Crystallographic and Thermodynamic date Criticall Evaluated by MSIT /ed. by G.Effanberg, S. Ilyenco.- Berlin, Heidelberg: Springer – Verlag, 2007. – Vol.11D2. – P. 1 – 55.
3. Garber M. E. (2010). Iznosostojkie belye chuguny [Wear resistant white cast iron]. Moskva: Mashinostroenie.
4. Tihonovich V.I. (1993) Razrabotka novyh lityh iznosostojkih zhelezohromuglerodistyh splavov dlja mashinostroenija za schet upravlenija ih strukturnym sostojaniem [Development of new cast wear-resistant iron-chromium-carbon alloys for mechanical engineering due to management of their structural state]Extended abstract of Doctor’s thesis. Kiev.
5. A. Bedolla-Jacuinde, R. Correa, J.G. Quezada, C. Maldonado. 2005. Effect of titanium on the as-cast microstructure of a 16%chromium white iron. Materials Science and Engineering A 398 (2005) 297–308.
6. Qingbao Wang and Xiaoyan Li. 2010. Effects of Nb, V, and W on microstructure and abrasion resistance of Fe-Cr-Chardfacing alloys. Welding journal. –S. 133.
7. Xiaowen Qi, Zhining Jia, Qingxiang Yang, Yulin Yang. 2011. Effects of vanadium additive on structure property and tribological performance of high chromium cast iron hardfacing metal. Surface & Coatings Technology 205 (2011) 5510–5514.
8. Y. F. Zhou, Y. L. Yang, D. Li, J. Yang and other. 2012. Effect of titanium content on microstructure and wear resistance of Fe – Cr – Chardfacing layers. Welding Journal. – S. 229.
9. Hai-yun LIU, Zhi-liang Song, Qing Cao, and other. 2016. Microstructure and properties of Fe – Cr – Chardfacing alloys reinforced with TiC – NbC. Journal of iron and steel research, International . – S. 276 – 280.
10. Nilay Yıksel and Salim Sahin. 2014. Effects of ferrobore and ferrochromium powder addition on abrasive wear Resistance of Fe-Based hardfacing coatings. Mechanical testing and microstructural investigation 56(2014).
11. Trotsan A. I. Modification of iron- carbon melts dispersible powders / A.I. Trotsan, I.L. Brodersky, V.V. Kaverinsky.- Saarbrucken: International Publishing Hous “LAP Lambert Academic Publishing. GmbH&Co KG, 2012. – 182 p.

12. Radomysel'skij I.D., Serdjuk G.G., & Shherban' N.I. (1985) Konstrukcionnye poroshkovye materialy. [Constructional powder materials]. Kiev: Tehnika.
13. Masljuk, V.A., Klimenko, V.N., Sambros, Ju.V. (1986). Spekanie, strukturoobrazovanie i svojstva poroshkovyh materialov sistemy karbid hroma – zhelezo [Sintering, structure formation and properties of powder materials of the system of chromium carbide – iron]. Poroshkovaja metallurgija - Powder metallurgy, 8, 39 – 44.
14. Masljuk, V.A. Bondar, A.A., Kuras', V.B., et al. (2013). Struktura ta vlastivosti poroshkovih materialiv kompozicii zalizo – visokovuglecevij ferohrom [The structure and properties of powder materials of the composition of iron - high carbon ferrochrome]. Poroshkovaja metallurgija - Powder metallurgy, 5/6, 66 – 74.

Одержано 25.01.18

В. А. Маслюк, Е. С. Караимчук, А. А. Бондарь

Тенденции создания и дополнительного легирования износостойких материалов на основе системы Fe – Cr – C

Резюме

Проведен обзор отечественных и зарубежных работ по получению и совершенствованию, путем дополнительного легирования, структуры и свойств материалов на основе железохромуглеродистых сплавов. Рассмотрена эффективность использования добавок металлов, тугоплавких соединений и РЗМ для легирования и модифицирования материалов на основе хромистых сталей и чугунов с целью управления их структурным состоянием и повышение физико-механических, физико-химических, триботехнических и эксплуатационных свойств.

V. A. Maslyuk, E. S. Karaimchuk, A. A. Bondar

Trends in the creation and additional alloying of wear-resistant materials based on the Fe – Cr – C system

Summary

The review of domestic and foreign works on obtaining and improving, by additional alloying, structure and properties of materials based on iron-chromium-carbon alloys was conducted. The efficiency of the use of metal additives, refractory compounds and REM for alloying and modifying materials based on chromium steels and cast irons for the purpose of controlling their structural state and increasing physical, mechanical, physical and chemical, tribological and operational properties is considered.