

КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

**Нечипоренко Олександр Анатолійович**

УДК 621.793:72.011:533.9

**РОЗРОБКА САМОФЛЮСЮЧИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА  
І ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЇХ ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ**

Спеціальність 05.16.06 - Порошкова металургія і  
композиційні матеріали

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ 1992

Робота виконана в Київському політехнічному інституті

- Науковий керівник - кандидат технічних наук,  
професор А. М. Степанчук
- Офіційні опоненти - доктор фізико-математичних  
наук, професор Ю. А. Куницький
- кандидат технічних наук,  
ведучий науковий співробітник  
С. В. Петров
- Ведуча організація - ІЕЗ ім. Е. О. Патона АН України

Захист дисертації відбудеться 18 січня 1993 р. на засіданні спеціалізованої ради К 068.14.09 Київського політехнічного інституту за адресою: 262056, Київ, пр. Перемоги, 37, КПІ, ІФФ.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці інституту. Ваш відгук, завірений гербовою печаткою, просимо вислати за вказаною адресою.

Автореферат розісланий 18 грудня 1992 р.

Вчений секретар спеціалізованої ради - к. т. н., ст. н. с.  
Піковський В. С.

ЛННБ України ім. В. Стефаника



00825634 (S)

ЛННБ ім. В. Стефаника  
АН УРСР

## АНОТАЦІЯ

Ціль роботи. Розробка самофлюсуючих сплавів на основі заліза (СФСЗ), а також процесу отримання покриттів із порошків цих сплавів методом повітряно-газового плазмового напилення (ПГПН), який забезпечує високий рівень властивостей покриттів.

Для досягнення поставленої цілі в роботі рішені такі задачі:

1) вивчити самофлюсуємість сплавів на основі заліза:

- дослідити вплив легуючих елементів на склад оксидної плівки, яка утворюється при окисленні сплавів, котрі леговані, зокрема, бором і кремнієм, в температурному інтервалі 1200-2400 К

- визначити співвідношення бору і кремнію в сплавах на основі заліза, яке забезпечує самофлюсуємість;

2) дослідити вплив легуючих елементів на властивості СФСЗ: твердість, жаростійкість, температуру плавлення, зносостійкість;

3) вивчити закономірності взаємодії частинок порошку СФСЗ різного гранулометричного складу з плазмовою струєю продуктів згорання вуглеводнів;

4) дослідити закономірності формування структури і властивостей покриттів із порошків СФСЗ.

Автор захищає наступні основні положення і результати:

1) результати дослідження самофлюсуємості сплавів на основі заліза;

2) результати дослідження структури і властивостей СФСЗ;

3) закономірності взаємодії порошку СФСЗ з повітряно-газовим плазмовим струменем;

4) результати дослідження властивостей покриттів із СФСЗ.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Методи газотермічного нанесення захисних покриттів займають одне з ведучих місць серед вискоєфективних технологічних процесів зміцнення і відновлення деталей і механізмів машин і устаткування. Практичний досвід їх використання показує, що напиленням покриттів можна, як правило, в 2-5 разів

зменшити знос деталей, які експлуатуються в умовах дії різноманітних середовищ і навантажень, а також ефективно відновлювати зношені деталі.

Властивості газотермічних покриттів, які одержують нанесенням порошків, визначаються як властивостями матеріалу, так і вибором методу напилення.

В залежності від поставленої цілі для напилення використовуються порошки різноманітних композицій і сплавів, серед яких особливе місце займають самофлюсуючі сплави на основі нікелю (СФНН), котрі мають високий рівень різноманітних властивостей.

Значним недоліком цих сплавів є висока їх вартість із-за дорожчечі і дефіцитності сировини. В зв'язку з цим розробка самофлюсуючих сплавів на основі заліза (СФЗ) для підвищення ефективності одержання покриттів і забезпечення високої їх якості являється актуальною.

Для одержання покриттів із цих сплавів доцільно застосувати метод повітряно-газового плазмового напилення (ППН). Використання суміші повітря і вуглеводневих газів (метану, пропану-бутану) в якості плазмотворних значно знижує собівартість процесу порівняно з традиційно використовуваними для цієї цілі газами (аргон, водень, азот та їх суміші).

Наукова новизна. Вивчена самофлюсуємість сплавів на основі заліза, легованих бором, кремнієм, вуглецем, хромом, марганцем і нікелем. Показано, що склад оксидної системи, яка утворюється в температурному інтервалі 1200-2000 К визначається головним чином оксидами бору і кремнію, мольна доля котрих складає 80-99 %, а при більш високій температурі - оксидом вуглецю CO, мольна доля якого при температурі 2400 К складає 95-99 %.

Розраховані коефіцієнти активності легуючих елементів СФЗ, значення яких для металів змінюються в межах 0,1-0,6, а для неметалів -  $10^{-6}$ - $10^{-2}$ . Коефіцієнт активності бору в 10-100 разів більший, ніж коефіцієнт активності кремнію. Останнє визначає близькі значення мольних долей оксидів цих елементів в плівці.

Встановлено, що при зниженні в сплаві кількості бору до 1,7 - 2,0 % (мас.) оксидна плівка збагачується оксидами кремнію, хрому і марганцю, що призводить до підвищення її температури плавлення вище температури плавлення сплаву, і, тим самим, до втрати

ним самофлюсуемості.

Вперше встановлений позитивний вплив хрому на самофлюсуемість СФСЗ: при підвищенні його концентрації в сплаві відбувається зменшення температури плавлення оксидної плівки за рахунок підвищення в її складі долі оксиду бору, що зв'язано з підвищенням коефіцієнта активності останнього.

Встановлений вплив ряду легуючих елементів на структуру, фазовий склад і властивості СФСЗ систем Fe-Ni-Cr-B-Si-C і Fe-Ni-Cr-B-Si-C-Cu-P. Показано, що в структурі легованих фосфором сплавів формується евтектика аустеніт -  $Me_3(B, C, P)$ , що знижує температуру плавлення сплавів до 1240 - 1320 К.

Практичне значення. Розроблені нові склади СФСЗ (заявка N 4866565/02), котрі відрізняються від відомих більш низькою температурою плавлення, високими жаростійкістю і зносостійкістю. Їх використання дозволяє значно знизити потребу в нікелі, дефіцит якого є в Україні, за рахунок скорочення використання СФСН. Розроблена технологія ППН порошоків СФСЗ. Визначені оптимальні режими наплення порошоків різних фракцій, що дозволяє одержувати покриття з низькою пористістю (3-8%), високою міцністю зв'язку з основою (до 40 МПа) при незначній втраті легуючих елементів в результаті окислення матеріалу порошку.

Розроблені порошки СФСЗ використовувались для відновлення деталей сільськогосподарської техніки. Досягнуто підвищення зносостійкості порівняно з новими деталями в 1,4-1,5 раз.

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на:

1) VI науково-технічній конференції молодих вчених і спеціалістів "Прогрессивные литейные технологии и материалы" (Київ, ІПІ АН України, 1989 р.); другій міжнародній конференції країн-членів РЕВ по покриттям (Київ, 1990 р.); конференції "Задачи трибологии в обеспечении качества, надежности и долговечности машин" (Київ, 1990 р.); конференції "Современные проблемы порошковой металлургии, керамики и композиционных материалов" (Київ, 1990 р.); XI Всесоюзній конференції "Поверхностные явления в расплавах и технологиях новых материалов" (Київ, 1991

р.); IV Всесоюзній науково-технічній конференції "Композиционные покрытия" (Житомир, 1991 р.);

Публікації. По результатам роботи опубліковано 11 друкованих робіт, в тому числі, одержано рішення про видачу авторського свідоцтва по заявці N 4866565/02.

Об'єм дисертації. Дисертаційна робота викладена на 194 сторінках машинописного тексту. Складається зі вступу, п'яти глав, висновків по роботі, додатку. Робота включає 32 таблиці, 48 рисунків. Список літератури вище 94 назви робіт.

## З М І С Т Р О Б О Т И

Плазмовий метод одержання покриттів - високоефективний процес. Однак із-за дорожечі плазмотворних газів (аргон, водень, азот), а також незручностей в їх використанні (велике балонне господарство) ефективність напilenня покриттів знижується. Вказані недоліки відсутні в методі ППІН, в якому в якості плазмотворних газів використовуються повітря і вуглеводневі гази. Високі теплофізичні властивості плазми продуктів згорання вуглеводнів, можливість регулювання окисно-відновлювального потенціалу її середовища забезпечують необхідні умови для одержання покриттів високої якості.

В результаті аналізу складів, властивостей СФСН і сплавів на основі заліза, легованих бором і кремнієм, показана перспективність розробки СФСЗ.

Разом з тим відмічається, що властивості СФСЗ вивчені недостатньо. Мало інформації про напilenня покриттів із таких покриттів. Дані про ППІН покриттів практично відсутні.

Для вивчення властивостей СФСЗ застосовувались методи металографічного, рентгенофазового, мікродюрOMETричного, мікрорентгеноспектрального, термічного аналізів. Оцінка вносостійкості проведена на машині тертя 2070СМТ-1. Хімічний склад сплавів і покриттів визначали спектральним аналізом. Пористість покриттів розраховували методом кількісної металографії. Побудування рівнянь регресії зроблено за допомогою проведення повного факторного експерименту (описання твердості сплавів) і некомпозиційного плану

другого порядку для п'яти факторів (описання оксидоутворення сплавів). Розрахунки проведені на ЕОМ ЕС 1841. Програми складені на мові програмування BASIC.

В третій главі представлені результати вивчення самофлюсуємості сплавів на основі заліза, а також дана оцінка можливості втрати легуючих елементів при окисленні сплавів в інтервалі температур 1200-2400 К.

Як відомо, самофлюсуємість сплавів забезпечується присутністю в їх складі шлакотворних елементів. При цьому утворюючийся в результаті окислення сплава шлак повинен мати температуру плавлення меншу, ніж температура плавлення сплава.

Стосовно сплавів на залізній основі головними елементами, котрі мають високу спорідненість до кисню, являються бор, кремній, вуглець, хром, марганець. На основі вивчення діаграм стану і систем, які включають оксиди цих елементів, а також заліва, зроблено висновок, що для надання сплавам самофлюсуємості необхідно забезпечити в складі утворюючогося шлаку певне співвідношення оксидів.

Встановлено, що основними елементами, утворюючими оксиди при окисленні СФСЗ, являються бор, кремній і вуглець. Кількість кожного оксиду залежить від кількості відповідного елемента в сплаві

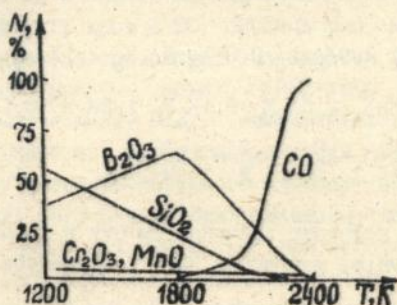


Рис. 1. Залежність мольної доли N оксиду від температури

і температури (рис. 1).

Для встановлення взаємного впливу легуючих елементів на оксидуєтворювання СФСЗ побудовані рівняння регресії другого порядку в двох температурних інтервалах: 1200-1600 К - в варіюванням вмісту бору, кремнію, хрому і марганцю; 1800-2400 К - в варіюванням вмісту бору, кремнію, вуглецю і хрому.

T=1200-1600 К

$$N(B_2O_3) = 79,8 + 18,8X_1 + 14,9X_2 - 1,9X_3 - 1,3X_4 + 3,3X_5 - 4,3X_1X_2 + 5,5X_1X_3 - X_3X_1X_4 - 5,4X_1X_5 - 2,8X_2X_3 + 1,3X_2X_4 - 1,8X_2X_5 + 1,5X_3X_4 + 0,5X_3X_5 - 0,6X_4X_5 - 7,4X_1^2 - 5,8X_2^2 - 1,3X_3^2 - 0,1X_4^2 - 0,5X_5^2 \quad (1)$$

$$N(SiO_2)^{1/8} = 0,1(14 - 2X_1 - X_2 + X_3 - 0,2X_4 - 0, X_5 - 0,1X_1X_2 + 0,02X_1X_3 + 0,01X_1X_4 + 0,2X_1X_5 - 0,1X_2X_3 + 0,04X_2X_4 + 0,02X_2X_5 + 0,1X_3X_4 - 0,004X_3X_5 + 0,02X_4X_5 - 0,03X_1^2 + 0,05X_2^2 - 0,2X_3^2 + 0,01X_4^2 + 0,04X_5^2) \quad (2)$$

$$N(Cr_2O_3)^{0,1} = 0,01(10 + 10X_1 - 18X_2 - 13X_3 - 0,2X_4 + 0,5X_5 - 3X_1X_2 - 0,3X_1X_3 - 0,1X_1X_4 + 0,3X_1X_5 + 2X_2X_3 + 0,3X_2X_4 + X_2X_5 + 0,2X_3X_4 + 2X_3X_5 - 0,1X_4X_5 - 7X_1^2 + 2X_2^2 + 0,7X_3^2 + 0,1X_4^2 - 0,2X_5^2) \quad (3)$$

$$N(MnO) = 4,2 - 0,7X_1 - 2,8X_2 - X_3 + 0,06X_4 - 0,1X_5 - 2,1X_1X_2 - X_1X_3 - 0,01X_1X_4 + 0,1X_1X_5 + 4,5X_2X_3 - 2,5X_2X_4 + 0,1X_2X_5 - 1,2X_3X_4 + 0,1X_3X_5 + 0,2X_4X_5 + 0,14X_1^2 + 0,5X_2^2 - 0,5X_3^2 + 0,3X_4^2 - 0,1X_5^2 \quad (4)$$

де:  $X_1 - X_4$  - кодоване значення вмісту в сплаві, відповідно, хрому, бору, кремнію, марганцю;  $X_5$  - температури.

T=1800-2400 К

$$N(B_2O_3)^{0,1} = 0,01(146 + 7X_1 + 4X_2 - 0,3X_3 - 8X_4 - 31X_5 - X_1X_2 - 0,4X_1X_3 +$$

$$+4X_1X_4+5X_1X_5-0,1X_2X_3+X_2X_4+2X_2X_5-0,3X_3X_4-0,2X_3X_5-10X_4X_5-2X_1^2-2X_2^2-0,6X_3^2+0,2X_4^2-21X_5^2) \quad (5)$$

$$N(SiO_2)^{1/8}=0,01(118-8X_1-6X_2+6X_3-7X_4-27X_5-0,5X_1X_2-0,1X_1X_3+3X_1X_4+8X_1X_5-0,3X_2X_3+X_2X_4+3X_2X_5-0,5X_3X_4-1,4X_3X_5-7X_4X_5-X_1^2+0,1X_2^2-2X_3^2-0,2X_4^2-11X_5^2) \quad (6)$$

$$N(Cr_2O_3)^0,1=0,01(94+13X_1-12X_2-8X_3-14X_4-20X_5-3X_1X_2-X_1X_3+0,4X_1X_4+2X_1X_5+X_2X_3+3X_2X_4+2X_2X_5+X_3X_4+3X_3X_5-4X_4X_5-5X_1^2+X_2^2-0,2X_3^2+X_4^2-13X_5^2) \quad (7)$$

$$N(CO)^{4/5}=\exp(0,01(297-23X_1-6X_2+X_3+36X_4+117X_5-2X_1X_2+X_1X_3+7X_1X_4+23X_1X_5-0,3X_2X_3+2X_2X_4+5X_2X_5-X_3X_4-X_3X_5-32X_4X_5-3X_1^2+0,2X_2^2-0,4X_3^2-15X_4^2-71X_5^2)) \quad (8)$$

де:  $X_1-X_4$  - кодоване значення вмісту в сплаві, відповідно, хрому, бору, кремнію, вуглецю;  $X_5$  - температури.

Вміст елементів в сплаві варіювали в таких межах,  $X$  (моль): бор 8-16, кремній 3-7, хром 4-20, вуглець 3-8, марганець 1-5.

На основі аналізу одержаних залежностей встановлено, що в підвищеннях температури в межах 1200-1800 К в оксидній плівці зростає вміст оксиду бору, зменшується - оксиду кремнію і практично не змінюється кількість оксидів хрому і марганцю. Підвищення вмісту в сплаві легуючого елементу призводить до зростання в шлаци доли його оксиду при зменшенні доли оксидів інших елементів. Виключення складає хром. При зростанні його концентрації в сплаві відбувається збільшення в плівці кількості оксидів хрому і бору. Останнє потрібно зв'язувати зі зміною коефіцієнтів активності, котрі зростають у хрому і бору і зменшуються в інших елементів.

Одержані результати дали змогу визначити вміст легуючих елементів в сплавах, при якому забезпечується самофлюсуємість. Наприклад, для сплавів з 6 % (мас.) хрому при вмісті бору не менше 2 % кількість кремнію в сплаві може досягати 4 %, щоб температура плавлення шлаку, який утворився при 1600 К, не перевищувала 1273 К. В разі ж 3 % бору вміст кремнію може досягти 10 %. При 12 % хрому для виконання цієї умови достатньо 2 % бору (при тій же кількості кремнію). При вмісті в сплаві бору до 1,7 - 2,0 % (мас.) плівка збагачується оксидами кремнію, хрому і марганцю, що приводить до підвищення її температури плавлення вище температури плавлення сплава і, тим самим, до втрати сплавом самофлюсуємості.

В температурному інтервалі 1800-2400 К в відповідності з рівняннями (5) - (8) найбільший вплив на процес оксидування температури: чим вона вища, тим більше утворюється CO, а кількість оксидної плівки зменшується. Відбувається швидке зростання доли утворюючогося CO: від 5-10 % (моль) при 1800 К до 95-99,5 % при 2400 К.

На основі вищесказаного зроблено висновок, що при напиленні порошків СФСЗ можливі втрати лише бору і вуглецю. Причому, до 1600-1800 К повинні бути втрати бору, а при температурах, вище 2000-2200 К - головним чином вуглецю.

В четвертій главі наведені результати оптимізації складів і властивостей СФСЗ.

Для надання сплавам високої зносостійкості і жаростійкості, зниження температури плавлення крім легування бором, кремнієм і хромом в їх склад доцільно ввести нікель, мідь, фосфор, вуглець.

Нікель і хром в сплавах на основі заліза використовуються як елементи, підвищуючі їх жаростійкість. Хром разом з бором і вуглецем утворюють тверді карбоборидні сполуки. Фосфор повинен покращувати триботехнічні властивості СФСЗ і знижувати їх температуру плавлення. Мідь має високу теплопровідність, що важливо при взаємодії порошку з плазмовим струменем.

Проведені порівняльні дослідження сплавів Fe-Ni-Cr-B-Si-C і Fe-Ni-Cr-Cu-B-Si-C-P.

Вивчена структура, а також закономірності зміни твердості

сплавів при звичайних і підвищених температурах, жаростійкості, температури плавлення, зносостійкості в залежності від їх складу.

Показано, що визначальний вплив на структуру сплавів робить вміст в них бору. При його концентрації 2 - 2,2 % (мас.) і вмісті решти елементів в межах: С 0,5-1,0; Si 1,4-2,6; Cr 3-16; Ni 10-30; Cu 0-6; P 0-0,5 % структура сплавів близька до евтектичної. Твердий розчин на основі заліза легований нікелем, хромом, кремнієм, вуглецем, міддю і фосфором. В залежності від вмісту хрому в сплавах змінюється тип твердих карбоборидних включень: від  $Me_2(B,C)$  і  $Me_3(B,C)$  при концентрації хрому 3-10 % до  $Me_7(B,C)_3$  при більш високій його концентрації. В склад карбоборидів входять залізо, хром, нікель, бор, вуглець.

Фосфідна евтектика в сплавах, що містять фосфор утворюється при повільному охолодженні розплаву заевтектичного складу на повітрі. При збільшенні швидкості охолодження до 800 - 1000 К/с утворюється евтектика, котра може ідентифікуватись як твердий розчин - борокарбофосфід  $Me_3(B,C,P)$ .

Мідь при вмісті в сплаві до 10 % (мас.) повністю знаходиться в складі твердого розчину. При більш високій концентрації відбувається виділення сферичних, збагачених цим елементом (до 90%) фаз, до складу яких входять решта елементів.

Твердість  $\sigma_{0.2}$ , легуваних міддю і фосфором, при кімнатній температурі може бути описана рівнянням регресії (знак елементу визначає кодоване значення його вмісту в сплаві):

$$HRC-47,88+7,63B+4,88C+0,63Si-1,88BC+0,38BSi-0,88CSi \quad (9)$$

Визначальний вплив на твердість сплавів здійснюють бор і вуглець.

При підвищених температурах твердість  $\sigma_{0.2}$  поступається твердості  $\sigma_{0.2H}$  при нагріві вище 773 К (рис. 2).

Сплави, леговані міддю і фосфором, при інших рівних умовах, зберігають більш високу твердість при нагріванні (криві 1 і 2 для порівняння). Хром найзначніше впливає на її зміну, що зв'язано з легуванням твердого розчину, а також утворенням в структурі  $\sigma_{0.2}$  карбоборидних сполук з високим (до 60 %) вмістом цього елементу (крива 3 - для сплаву з 30 % Cr).

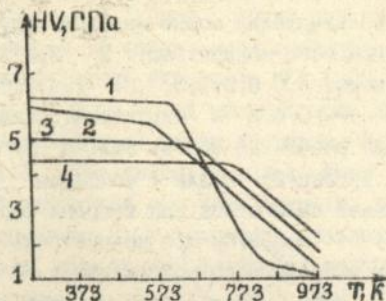


Рис. 2. Залежність твердості СФСЗ від температури:  
1, 2, 3 - сплави на основі заліза; 4 - нікелевий сплав  
ПГ-ХНВОСР2 (для 4 - літературні дані)

Підвищення жаростійкості СФСЗ важливо для запобігнення інтенсивного оксидування при окисленні сплавів в твердому стані. Останнє може привести до значного підвищення в оксидній плівці вмісту оксидів заліза і неможливості її розплавлення при оплавленні покриття.

Встановлено, що СФСЗ не поступаються в жаростійкості СФСН при легуванні їх хромом і нікелем в межах 10-15 % і 20-30 %, відповідно (для порівняння взятий сплав АН9). На ДТА-грамах (рис. 3) спостерігається, як правило, два значних екзотермічних ефекта і один ендоефект, який відповідає плавленню сплаву за рахунок втрати плівкою захисних властивостей. Другий екзоефект зв'язаний, певно, з появою рідкої шлакової фази, за рахунок чого також збільшується швидкість окислення.

Температура плавлення сплавів, легуваних міддю і фосфором, складає 1240-1320 К (при вмісті хрому до 8-10 %). Для системи, яка не містить мідь і фосфор, мінімальне значення температури плавлення лежить в області 1320-1390 К. Хром підвищує її значення, що зв'язано в природою цього елемента і його сполук.

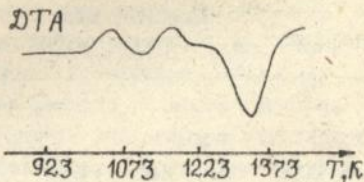


Рис. 3. Результати термічного аналізу СФСЗ з 20 % Ni і 5 % Cr.

Результати досліджень зносостійкості СФСЗ показали, що введення фосфору в сплави сприяє її підвищенню на 30-50 %. Це пов'язано з тим, що фосфор виконує роль хімічного модифікатора складу вторинних структур, підвищуючи їх стійкість.

В п'ятій главі викладені результати досліджень взаємодії частинок порошку СФСЗ з повітряно-газовим плазмовим струменем і властивостей покрить.

З цією ціллю застосована математична модель плазмового наплення порошоків, яка розроблена в інституті газу АН України. Проведений розрахунок ступеня розплавлення частинок при напленні, температури їх поверхні і швидкості польоту в плазмовому струмені при русі від зрізу сопла плазмотрону (ПУН 1) до підкладки.

В ролі модельного взято порошок сплаву з вмістом, мас. %: Ni - 20, Cr - 8, Cu - 5, В - 2,5, Si - 2,4, С - 0,8, Р - 0,4, Fe - решта і температурою плавлення 1323 К.

Встановлений вплив розміру частинок порошку, струму дуги плазмотрону, коефіцієнта надлишку повітря (КНП), витрат повітря і порошку, діаметра сопла плазмотрону на температуру і швидкість руху частинок.

Встановлені оптимальні режими наплення порошоків різних фракцій (таблиця).

Показано, що при напленні на оптимальних режимах частинки розміром 50-60 мкм перегріваються до температури 1800-2000 К і мають максимальну швидкість 200-240 м/с на відстані 50-90 мм від зрізу сопла плазмотрону. Збільшення дистанції в межах 120-200 мм призводить до зменшення швидкості польоту частинки на 20-30 %.

Оптимальні режими напилення порошоків фракцій 50-200 мкм

Параметр напилення	Фракція, мкм						
	50	60	80	100	120	160	200
напруга, В	250						
струм, А	180	220	220	240	240	250	240
витрати повітря, м <sup>3</sup> /год	6	9	6	6	6	6	5

Для більших фракцій перегрів частинок нижче (за виключенням фракцій 160 - 200 мкм), температура поверхні при наблизненні до підкладки складає 1500-1700 К. Падіння швидкості польоту частинки при збільшенні дистанції тим менше, чим крупніша фракція порошку.

Поверхня частинок розміром 160-200 мкм перегрівається до температури 2000-2400 К. Однак вже на дистанції 100 мм її значення складає 1400-1600 К, і в цьому разі до підкладки підлітають частинки з мінімальним перегрівом.

Встановлений характер поведінки частинок в плазмовому потоці підтверджує те, що при напиленні неізомерних порошоків можливе формування неоднорідних по фазовому і хімічному складу покриттів. В зв'язку з цим для забезпечення високої якості покриттів необхідно використовувати максимально однорідні по гранулометричному складу порошки.

Зміна витрат порошку в межах 5-12 кг/год не здійснює значного впливу на закономірності напилення, що зв'язано з теплофізичними характеристиками повітряно-газового плазмового струменя.

Застосування плазмотрону з діаметром сопла 10 мм при напиленні порошку СФСВ недоцільно, оскільки в цьому разі відбувається падіння швидкості польоту частинок на 30-40 %.

Зменшення КНП приводить до зростання ступеня прогріву частинок і швидкості їх польоту. При цьому чим менший розмір частинок, тим значніший вплив цього параметру.

Проведені експериментальні дослідження ППН порошоків СФСЗ.

Показана відповідність розрахункових і експериментальних даних по вибору режимів напилання. Встановлено, що при напиланні на оптимальних режимах має місце повне розплавлення частинок порошку, в результаті чого формується однорідна шарувата структура покриття з незначним вмістом оксидних включень. Покриття мають пористість 3-8 %, міцність зчеплення в підкладку 25-40 МПа.

Визначені втрати бору, кремнію і вуглецю при ППН СФСЗ. Показано, що втрати цих елементів не перевищують 0,2-0,4 %, 0,1 % і 0,1-0,2 %, відповідно.

Покриття із порошоків СФСЗ, для яких співвідношення легуючих елементів відповідає встановленій області самофлюсуємості сплавів, після оплавлення мають однорідну безпористу структуру. В протилежному разі в структурі покриття містяться шлакові включення.

#### Загальні висновки.

1. Розроблені нові самофлюсуючі сплави на основі заліза, які мають властивості, що характерні для самофлюсуючих сплавів на основі нікелю: широкий діапазон зміни твердості, знижена температура плавлення, високі жаростійкість і зносостійкість.

2. Досліджена самофлюсуємість сплавів на основі заліза: проведена оцінка окислення легуючих елементів сплавів при окисленні останніх в діапазоні значень температури 1200-2400 К. Показано, що основними елементами, які утворюють оксиди, являються бор, кремній і вуглець. Описаний вплив складу сплавів і температури на цей процес. Показаний позитивний вплив хрому на самофлюсуємість сплавів, який полягає в підвищенні доли оксиду бору в пливці, за рахунок підвищення коефіцієнта активності бору в сплаві при збільшенні вмісту хрому. Визначені співвідношення концентрацій бору, кремнію і хрому в сплавах, при яких останні можуть самофлюсуватись. Показано, що сплави, які мають менше 1,7 - 2,0 % (мас.) бору не можуть самофлюсуватись.

3. Вивчена структура СФСЗ, для якої характерна наявність евтектик твердий розчин - карбоборид або борокарбофосфід, тугоплавких карбоборидних фаз типу  $Me_2(B,C)$ ,  $Me_3(B,C)$ ,  $Me_{23}(B,C)_6$ ,  $Me_7(B,C)_3$ . Вивчений розподіл елементів між ними. Показано, що в

структурі СФСЗ при вмісті міді вище 10 % (мас.) формуються фази на основі міді.

4. Вивчені властивості сплавів. Твердість визначається головним чином кількістю уведених бору і вуглецю. При підвищених температурах сплави, леговані хромом, фосфором і міддю, зберігають підвищену твердість. Розроблені СФСЗ, які мають температуру плавлення 1240 - 1320 К з жаростійкістю на рівні СФСН, що досягається легуванням фосфором, хромом і нікелем.

Зносостійкість розроблених сплавів, легованих фосфором, порівняно з безфосфорними вище на 30 - 50 %, що слід зв'язувати з модифікуючим впливом фосфору на склад вторинних структур, які утворюються при терті.

5. Вивчена взаємодія порошків СФСЗ з повітряно-газовим плазмовим струменем. Визначений вплив струму дуги плазмотрону, витрат повітря і порошку, КНП, розміру частинок порошку, діаметра сопла плазмотрону на температуру і швидкість руху частинок. Визначені оптимальні режими наплення покриттів із порошків СФСЗ (для фракцій 50-200 мкм) методом ПГПН, при яких частинка порошку має максимальну швидкість польоту і мінімальний перегрів вище температури плавлення.

6. Вивчені властивості покриттів із порошків розроблених сплавів. Показано, що при ПГПН СФСЗ забезпечується висока адгезія покриття до підкладки (до 40 МПа), низька пористість (3-8 %), а також незначні втрати легуючих елементів. Показано, що покриття із порошків СФСЗ, в яких вміст бору вище граничного (1,7 - 2 %), при оплавленні утворюють однорідну структуру без пор і шлакових включень.

7. Високий рівень властивостей покриттів із розроблених СФСЗ підтверджується проведеними промисловими випробуваннями.

Головні результати дисертації викладені в наступних публікаціях:

1. Stepanchuk A. N., Nechiporenko A. A., Vdovichenko N. S. New wear resistant self-fluxing iron-based alloys for thermal spraying. The First European East-West Symposium on Materials and Process "MatTech'90", 1990, Helsinki (Finland). - 1 p.

2. Степанчук А. Н., Нечипоренко А. А., Вдовиченко Н. С. Из-

носостойкость плазменных покрытий из самофлюсующихся сплавов на основе железа. Респ. конф. "Задачи трибологии в проблеме повышения качества, надежности и долговечности машин". Киев, 1990. - с. 26.

3. Степанчук А. Н., Нечипоренко А. А., Вдовиченко Н. С. Распыленные порошки самофлюсующихся сплавов на основе железа для газотермического напыления. Межресп. науч.-техн. конф. "Прогрессивные методы получения конструкционных материалов и покрытий, повышающих долговечность деталей машин", Волгоград, 1990. - с. 39.

4. Степанчук А. Н., Нечипоренко А. А., Вдовиченко Н. С. Получение и свойства самофлюсующихся сплавов на основе железа // Современные достижения в области техники и применения газотермических и вакуумных покрытий. Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1991. - с. 78-84.

5. Нечипоренко А. А., Пожытько С. К. Износостойкие плазменные покрытия из самофлюсующихся сплавов на основе железа // Сверхтвердые и композиционные материалы и покрытия, их применение. Киев: ИСМ АН УССР, 1991. - с. 97-99.

6. Нечипоренко А. А., Степанчук А. Н., Марцевой Е. П. Теоретическое исследование свойства самофлюсования сплавов на основе железа. IV Всесоюзная науч.-техн. конф. "Композиционные покрытия", Житомир, 1991. - с. 12.

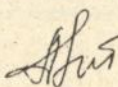
7. Степанчук А. Н., Нечипоренко А. А. Влияние бора, кремния и хрома на структуру самофлюсующихся сплавов на основе железа. Там же. - с. 30.

8. Степанчук А. Н., Нечипоренко А. А., Вдовиченко Н. С. Исследование газотермических покрытий из самофлюсующихся сплавов на основе железа // Адгезия расплавов и пайка материалов, 1991. - Вып. 26. - с. 63-65.

9. Самофлюсующиеся сплавы на основе железа. Нечипоренко А. А., Степанчук А. Н., Лобода П. И. и др. // Там же. - 1992. - Вып. 27. - с. 93-95.

10. Высокотемпературное окисление самофлюсующихся сплавов на основе железа. Нечипоренко А. А., Степанчук А. Н., Проценко Т. Г. и др. // Там же. - Вып. 28. - с. 62-65.

11. Рішення про видачу авторського свідоцтва від 20.05.91 по заявці N 4866565/02. Износостойкий самофлюсующийся сплав / Степанчук А. Н., Нечипоренко А. А., Вдовиченко Н. С. Дата подання 09.07.90.



АНБ им. Б. Стефановича  
АН УССР

Подп. к печ. — 0.12.22.      Формат 80×54/16 Бумага Тисс 4/2  
Печ. офс. Усл. печ. л. 0,03      Уч.-изд. л. 0,66      Тираж 100.  
Зак. 2-3714

---

Киевская книжная типография научной книги. Киев, Решина, 4.



As 26.611  
**AB 26.611**