

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона

На правах рукопису

П А Н Ь К О
Михайло Тарасович

УДК 621.793.7

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ПОВІТРЯНО-ГАЗОВОГО
ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ
ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ
ІЗ ПОРОШКІВ НА ОСНОВІ СТРУЖКИ СІРОГО ЧАВУНУ

05.03.06 —

технологія і обладнання для зварювання та суміжних процесів

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеню
кандидата технічних наук

Київ 1996



00759871 (.)

Робота виконана в Інституті електротехніки
УкраїниНауковий керівник: доктор технічних наук,
професор Ю.С. ВорисовОфіційні опоненти: доктор технічних наук,
професор В.О. Рояновкандидат технічних наук
В.П. Дьохова

Провідна установа: концерн "Мотортехніка"

Направляємо Вам для ознайомлення автореферат дисертації інженера Панько М.Т. Просимо Вас і співробітників Вашої установи прийняти участь в засіданні спеціалізованої ради або вислати свої відгуки в двох примірниках, завірені гербовою печаткою установи, за адресою: 252650, Київ, вул. Воженко, 11, ІЕЗ ім. Є.О. Патона, вченому секретарю спеціалізованої ради.

Захист дисертації відбудеться "12" 06 1996 р. о 10 год на засіданні спеціалізованої ради К 50.02.02 при Інституті електровва-
рювання ім. Є.О. Патона НАН України.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці інституту.

Автореферат розісланий "08" 05 1996 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради

доктор технічних наук

А.А. Бондаренко
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дисертаційна робота присвячена розробці технології повітряно-газового плазмового напилення (ПГПН) покриттів з мікрокристалічною структурою із порошків на основі стружки сірого чавуну (СЧ). Висока зносостійкість покриттів із таких порошків в поєднанні із зниженням витрат на їх нанесення дозволяє ефективно застосовувати їх для відновлення та зміцнення деталей машин в різних галузях машинобудування.

Актуальність теми.

Газотермічне напилення (ГТН) покриттів є прогресивним напрямком економії сировини і матеріалів, підвищення надійності, довговічності і експлуатаційних характеристик машин і агрегатів. Однак перехід до широкомасштабного виробництва деталей із зносостійкими покриттями стримує проблема високої вартості матеріалів для ГТН, серед яких найбільш поширеними є порошки нікелевих, кобальтових сплавів і високолегованих сталей. Їх використання в багатьох випадках необгрунтоване, особливо при відновленні деталей машин, так як необхідний рівень службових характеристик можуть забезпечити газотермічні покриття (ГТП) із більш дешевих низьколегованих залізних сплавів і композицій на їх основі, в тому числі нанесені при використанні повітря як основного робочого газу. Одним із шляхів подальшого зниження витрат на виробництво деталей в ГТП є використання в якості матеріалів для напилення відходів різних виробництв, серед яких перспективним джерелом для одержання порошків на залізвуглецевій основі є стружка СЧ. З іншого боку залізвуглецеві (Fe-C) сплави, такого складу як СЧ, відносяться до матеріалів, в яких у випадку надшвидкого охолодження із швидкостями $10^5 \dots 10^6$ К/с, характерних для ГТН, можливе виникнення метастабільної мікрокристалічної складової структури (ϵ -фази) з підвищеною твердістю (10000 МПа) при збереженні пластичності, що забезпечує її підвищений опір до зношування. Аналіз стану проблеми показав, що на сучасному етапі технології плазмового напилення, яка забезпечує формування метастабільних фаз в покриттях із Fe-C сплавів на основі стружки, не існує.

Метою роботи є вивчення закономірностей впливу умов ПГПН порошків, одержаних із чавунної стружки, на структуру і властивості покриттів та розробка на основі цього матеріалів і технології для одержання покриттів із комплексом підвищених фізико-механічних і експлуатаційних характеристик при понижених витратах на їх одержання.

В дисертаційній роботі вирішуються такі завдання:

1. Дослідження впливу способу переробки стружки СЧ на зміну хімічного складу, структуру і властивості одержуваних порошків.
2. Теоретичне дослідження термічних умов формування ГТП із порошків системи Fe-C-Si, впливу умов напилення на фазовий склад покриттів.

3. Розробка композиційних порошоків (КП) і порошкових сумішей (ПС) на основі порошоків із стружки СЧ та дослідження фазового складу і структури повітряно-газових плазмових покриттів (ПГП) із них.

4. Дослідження властивостей ПГП із порошоків на основі стружки СЧ.

5. Розробка практичних технологій відновлення зношених деталей методом ПГП з використанням матеріалів на основі порошоків із стружки.

Автор захищає:

1. Експериментальні дані про вплив умов переробки стружки СЧ на зміну хімічного складу, структуру і властивості порошоків для ГТН.

2. Теоретичні та експериментальні дані про розподіл теплових процесів в залежності від умов напilenня при формуванні ПГП із порошоків сплавів Fe-C-Si і їх вплив на фазовий склад таких покриттів.

3. Закономірності впливу фазового складу і структури ПГП із порошоків на основі стружки СЧ на їх міцність зчеплення з основою, мікротвердість, зносостійкість в умовах тертя ковзання, газообразивного та абразивного зношування.

4. Нові практичні рішення про застосування покриттів із порошоків на основі стружки СЧ для відновлення зношених деталей машин.

Наукова новизна роботи.

1. Вивчено умови утворення метастабільних фаз в ГП із порошоків сплавів Fe-C-Si, а також досліджено закономірності їх розпаду в процесі напilenня. Встановлено, що для досягнення максимальної кількості ϵ -фази в структурі ГП розмір напильованих часток сплавів Fe-C-S не повинен перевищувати 160 мкм, вміст вуглецю в них не повинен бути нижчим за 2,5 мас. %, а температура основи не повинна перевищувати 400 К.

2. Показано можливість одержання ПГП із порошоків на основі стружки СЧ в структурою метастабільної ϵ -фази і встановлено, що підвищення її вмісту в структурі забезпечують оптимальні з точки зору максимального коефіцієнту використання матеріалу (КВМ) режими напilenня і застосування охолодження напильованого взірця повітряними струменями.

3. Вперше встановлено, що із збільшенням вмісту ϵ -фази в структурі ПГП із порошоків СЧ в них формуються переважно внутрішні напруження стиску, підвищується їх міцність зчеплення з основою, мікротвердість при підвищених температурах, газообразивна і абразивна зносостійкість.

Практична цінність. Вперше показано ефективність застосування порошоків із стружки СЧ для ГТН зносостійких покриттів. Розроблено технологію переробки стружки, що дозволяє одержувати для ГТН недорогі порошки, нові склади КП, ПС і технологію їх ПГП, що забезпечує одержання покриттів з високим рівнем фізико-механічних властивостей. Вперше показано можливість досягнення вищого рівня зносостійкості в умовах тертя ковзання ПГП із порошоків на основі стружки СЧ в порівнянні з

покриттями із гальванічного хрому та плазовими покриттями із нікелевих сплавів. Розроблено технологічні рекомендації і підготовлено технічну документацію на серійне виробництво ПС. Реалізацію роботи здійснено шляхом проведення виробничих випробовувань і впровадження розроблених матеріалів і технології їх ППН на Микулинецькому спеціалізованому заводі, Глумацькому ДМП "Транспортник" і Рожнятівському РТП.

Апробація роботи. Основні наукові положення дисертації доповідалися і обговорювалися на конференціях "Стан і перспективи відновлення та зміцнення деталей машин" (Москва, 1994 р.), "Мотортехнологія 94" (Київ, 1994 р.), "Ресурсо- та енергозберігаючі технології в машинобудуванні" (Одеса, 1995 р.), міжнародній конференції "Лазерні і фізико-технічні методи обробки матеріалів" (Алушта, 1995 р.), міжнародному семінарі "Захисні покриття в енергетиці" (Київ, 1995 р.), міжнародних конференціях TS'96 (Ессен, ФРН, 1996 р.), "Ресурсо-, енергозберігаючі і екологічно чисті технології у виробництві деталей із композиційних матеріалів" (Славське, Україна, 1996 р.).

Публікації. По темі опубліковано 10 робіт, в тому числі одержано 2 позитивних рішення про видачу авторських свідоцтв на винаходи.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, 6 глав, загальних висновків, переліку літератури із 165 джерел та додатків. Робота викладена на 179 сторінках друкованого тексту, містить 63 рисунки, 33 таблиці.

У вступі обгрунтовано актуальність теми, розкрито наукову новизну і практичну цінність роботи, сформульовано основні положення, що винесені на захист.

В першій главі проведено аналіз літератури по питаннях дисертації. Розглянуто основні види низьколегованих матеріалів на основі Fe-C сплавів для ГТН, способи їх одержання, недоліки використання, звернуто увагу на невеликий об'єм порошків. Приведено закономірності впливу температурно-часових умов обробки на структуру Fe-C сплавів. Показано особливості формування структури в умовах ГТН і впливу технологічних параметрів на властивості покриттів із низьколегованих Fe-C сплавів. Розглянуто особливості стружкових відходів механічної обробки, вказано на можливість їх використання для ГТН. Звернуто увагу на те, що питання одержання покриттів із порошків на основі стружки Fe-C сплавів не було досліджене. В результаті сформульовано мету та завдання роботи.

В другій главі приведено характеристики об'єктів дослідження, технологічного обладнання для одержання порошків та плазового наплення, розглянуто методики дослідження структури і властивостей матеріалів і покриттів.

В третій главі досліджено хімічний склад, структуру і властивості

порошків СЧ із стружки, викладено результати теоретичних досліджень термічних умов формування ГТП із порошків сплавів Fe-C-Si, проаналізовано вплив умов напilenня на фазовий склад покриттів, вибрано раціональні технологічні режими ПГПН, приведено результати експериментальних досліджень структури ПГПН із порошків СЧ.

Четверта глава присвячена розробці КП і ПС на основі порошків із стружки СЧ та дослідженню фазового складу і структури ПГПН із них.

В п'ятій главі досліджено комплекс властивостей ПГПН із порошків на основі стружки СЧ та їх зміну в процесі термічного впливу.

В шостій главі розроблено схему одержання ПГПН на основі порошків із стружки СЧ, вибрано раціональні методи переробки стружки та режими повітряної сепарації порошків, приведено технологічні рекомендації на виробництво ПС, розроблено технології ПГПН покриттів та приведено приклади їх виробничих випробовувань.

МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В якості об'єкту дослідження вибрано стружку СЧ, що за складом відповідають концентраційному інтервалові утворення в сплавах Fe-C-Si ϵ -фази, одержані після свердління і розточування (стружка 1) та фрезерування (стружка 2 і 3) заготовок (табл.1). Порошки одержували відсіюванням від стружки на віброгрохоті RM-532 фірми Grace (Чехія), а також подрібненням її крупних фракцій в кульковому млині (КМ) конструкції ОКТЕ ІПМ НАН України та конусній інерційній дробарці КИД-60. Гранулометричний склад порошків визначали по ГОСТ 183-73 на установці 029. Видалення вільного графіту проводили на повітряному класификаторі порошку виробництва СКТВ БР НВО ІМ. Зовнішній вигляд порошків вивчали на електронному растровому мікроскопі JSM-840 фірми Джеол (Японія). Текучість порошків визначали по ГОСТ 20899-75. Покриття наносили на установці для плавомого напilenня "Київ-7". Металографічні дослідження проводили на оптичному мікроскопі Неофот-32 (Німеччина). Мікротвердість при кімнатній температурі визначали на приладі ПМТ-3 по ГОСТ 19440-74. Рентгеноструктурний аналіз виконували на дифрактометрах ДРОН-УМ1 і ДРОН-3.0. Фазові перетворення при неперервному нагріванні вивчали методом ДТА на установці ВДТА-8М конструкції ОКТЕ ІМФ НАН України. Вміст кисню визначали на приладі RO-316 фірми ЛЕКО (США). Залишкові напруження першого роду в покриттях визначали по зміні прогину зразків у вигляді плоских пластинок при пошаровому з травлюванні поверхневих шарів електрохімічним методом на установці РОН. Дилатометричні дослідження і визначення коефіцієнту термічного розширення покриттів проводили за допомогою каткового та кварцевого дилатометра ДКВ-4 конструкції ГІС. Характеристики пружності (модуль Юнга) визначали по методиці КОІ (Молдова). Міцність зчеплення покриттів з основою визначали

методом нормального відливу конічного штифта. Вимірювання "гарячої" мікротвердості покриттів проводили на приладі ПМТН у вакуумі в інтервалі температур 20...750 °С. Тріботехнічні характеристики покриттів в умовах тертя ковзання з обмеженим змащуванням досліджували на машині УМТ-1 в парі в контртілом із чавуну (235 НВ, Ra-2,5 мкм) при ступінчастому збільшенні питомого навантаження на 4 МПа через кожні 1000 м шляху в діалазоні 4...16 МПа і швидкості ковзання 1,5 м/с та машині МТ-22М в парі в контртілом із сталі 40Х (HRC 40) при питомому навантаженні 10,2 МПа і швидкості ковзання 1,0 м/с протягом 6 год. Випробовування покриттів на газоабразивну вносостійкість проводили на центробіжному прискорювачі ЦУК-3М по ГОСТ 23.201-73. Дослідження абразивного зношування проводили при терті покриття об нежорстко закріплені частки абразиву по схемі "покриття - резинове кільце" при лінійній швидкості ковзання 0,5 м/с, силі притискання кільця 10 Н, в подачу в зону тертя абразиву з розходом 19,5 г/хв. Усі кількісні вимірювання проводили з наступною математичною обробкою.

Таблиця 1

Хімічний склад стружки СЧ і одержаних з неї порошоків

Матеріал (метод одержання порошку)	Розмір часток порошку, мкм	Масова доля елементів, %		
		Свар	Si	ГО
Стружка 1	-	3,60	2,70	0,36
Порошок (відсіювання) (СЧ1)	-100 + 63	3,70	2,80	1,20
Порошок (подрібнення КМ)	-100 + 63	8,25	3,13	3,11
Стружка 2	-	3,45	1,91	0,05
Порошок (подрібн. КМ) (СЧ2)	-160 + 100	4,10	2,22	1,40
	-100 + 63	7,90	2,21	2,90
	< 63	19,20	2,20	5,10
Стружка 3	-	4,65	1,30	0,07
Порошок (подрібн. КИД) (СЧ3)	-100 + 63	4,70	1,10	0,75

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Встановлено, що на хімічний склад порошоків СЧ, одержаних із стружки, впливає метод її переробки. Так в порошках, одержаних подрібненням стружки в КМ, при збільшенні дисперсності від 160 до більшої за 63 мкм концентрація графіту, внаслідок викришування, збільшується в 4,7...4,8 раза (табл.1). В порошках, одержаних шляхом відсіювання від стружки, а також подрібненням її в КИД, такого підвищення вмісту графіту не відбувається. За фазовим складом порошки після відсіювання чи

подрібнення не відрізняються від вихідної стружки - в структурі присутні ферит, графіт, цементит, і характеризуються неправильною формою часток. В порошках, одержаних подрібненням стружки в КМ, міститься найбільша кількість графітових часток з розмірами меншими за 20 мкм, що суттєво погіршує їх текучість в порівнянні з порошками, одержаними іншими методами.

При ГТН визначальними для формування фасового складу покриттів є теплові процеси, що протікають при охолодженні напилованих часток на поверхні основи. Для їх вивчення розглянута математична модель охолодження напиленої деформованої частки на напівнескінченній основі через шар покриття з врахуванням його подальшого нарощування. Стосовно даної моделі для оцінки умов охолодження часток використано рівняння теплопровідності Фур'є для випадку одномірного теплового потоку і незмінності теплофізичних характеристик напиленої частки.

В результаті розрахунків підтверджено, що швидкість охолодження ($V_{\text{охол}}$) напилених часток сплавів Fe-C-Si, які за складом відповідають порошкові СЧ1 (табл.1), на поверхні основи наближається до значення 10^6 К/с, і показано, що збільшення товщини покриття до 2,5 мм приводить до зниження $V_{\text{охол}}$ в 1,7...1,8 раза.

З метою аналізу можливих структурних станів в ГТП із сплавів Fe-C-Si був використаний прийом суміщення в єдиному температурно-часовому полі діаграм "температура-час-перетворення" і кривих охолодження напилених часток, що раніше застосовувався для аналізу умов утворення аморфних структур. Результати розрахунків для випадку ГТН сплаву Fe-3,7C-2,8Si представлені на рис.1,а. До інших вихідних даних для розрахунку відносяться: початкова температура розплаву - 1500 К; температура сталльної основи - 300 К. Одним із найбільш важливих параметрів процесу формування структурного стану є товщина деформованих часток ($\delta_{\text{ч}}$). При використанні для напилення порошку з розміром часток від 10 до 160 мкм і степені деформації 10...15, що звично спостерігається, $\delta_{\text{ч}}$ становить від 1 до 10 мкм. Крім цього розглядалися випадки напилення цих часток як безпосередньо на сталеву основу, так і на поверхню попередньо сформованого покриття товщиною 1 мм. Встановлено, що в умовах охолодження часток товщиною 1...10 мкм найбільш реальною структурною складовою першого шару покриття, що прилягає до основи, є ϵ -фаза (рис.1,а). Тільки при товщинах часток більших за 10 мкм виникає можливість появи γ -фази. В результаті нарощування шару покриття до товщини 1 мм інтенсивність охолодження напилених часток знижується, що приводить до зменшення вмісту ϵ -фази за рахунок утворення γ -фази. Другим фактором, що впливає на фазовий склад покриття, яке одержують із порошків сплавів Fe-C-Si, являється вміст в них вуглецю. Так зниження

Його до 2,5 мас. % приводить до зменшення імовірності формування ϵ -фази при збільшенні вмісту аустеніту (рис.1, а, штрихова лінія). При вмісті вуглецю нижчим за 2,3...2,5 мас. % умов для утворення ϵ -фази при ГТН не існує. При подальшому його зниженні до величин менших за 1,8 мас. % можлива поява в структурі мар тенситу. У випадку нагріву де талі в покриттях в процесі наплення за рахунок впливу високотемпературного газового струменя і потоку гарячих напилених часток можливе протікання структурних перетворень в напиленому шарі з розпадом метастабільних ϵ - і γ -фаз і утворенням α -Fe і Fe₃C.

Застосування охолодження основи (о.о.) з засобом відвернення такого розпаду (рис.1,б). Результати теоретичних розрахунків дозволили встановити основні фактори ГТН, при яких в покриттях досягається максимальна кількість метастабільних фаз. Для вибору ж конкретних технологічних режимів ППН порошоків СЧ використали математичне планування експерименту. Показником ефективності процесу вибрали КЕМ, як фактори використовували дистанцію наплення (X_1), електричну потужність плазмотрона (X_2), витрату плазмоутворюючого газу (X_3), процентний вміст пропан-бутану в плазмоутворюючому газі (X_4).

Рівняння регресії має вигляд: $Y'' = 0,41 - 0,07X_1 + 0,09X_2 + 0,07X_3 + 0,06X_4$. В результаті встановлені оптимальні (за ознакою КЕМ = max) режими ППН порошоків СЧ: $X_1 = 210$ мм; $X_2 = 51,0$ кВт; $X_3 = 3,8$ м³/год; $X_4 = 4,0$ %, при цьому КЕМ = 0,77.

Експериментально досліджено, що ППН із порошоків СЧ, нанесені при

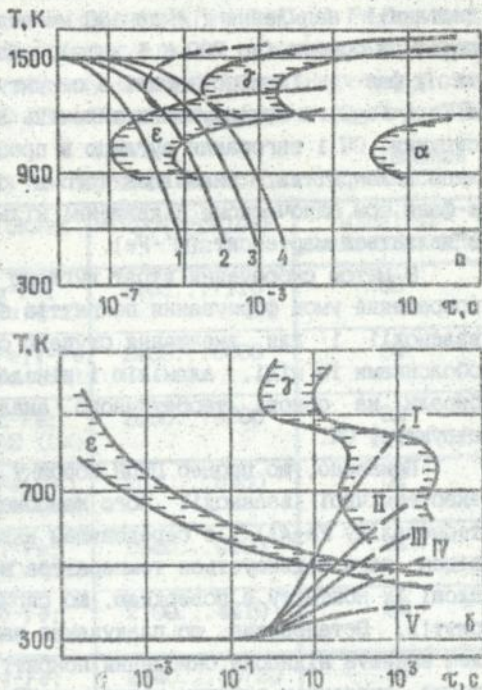


Рис. 1. Вплив товщини часток сплаву Fe-C-Si при охолодженні на сталевій основі (а) і умов ГТН (б) на фазовий склад покриттів: $\delta_{\text{C}} = 1$ (1), 2 (2), 5 (3) і 10 мкм (4); $G_{\text{H}} = 1$ (I, III, IV, V), 2 кг/год (III); $L = 100$ (I), 250 мм (II...V); $N = 50$ кВт; без о.о. (I...III) та з о.о. повітряними (IV) і водоповітряними (V) струменями.

рівних режимах, характеризуються багатофазною структурою, яка містить ϵ -фазу, аустеніт, а в деяких випадках - ферит і цементит. Ведучою фазою в більшості випадків є γ -Fe. Підвищення вмісту ϵ -фази в структурі забезпечують оптимальні режими ППН і охолодження напилуваного зв'язки повітряними струменями. При відсутності такого охолодження при напильненні в ППН спостерігаються тільки сліди ϵ -фази (табл.2). Зменшення дистанції напильнення (L) до 100 мм веде до ще більшого підвищення температури основи (до 700 K і вище), що приводить до повного розпаду ϵ -та γ -фаз і їх відсутності в структурі покриттів (основними фазами є α -Fe і Fe₃C). Викришування включень вільного графіту при подрібненні стружки СЧ і вигорання вуглецю в процесі ППН знижують кількість вуглецю в покриттях, внаслідок чого в структурі зменшується кількість ϵ -фази при одночасному підвищенні кількості γ -Fe, а в деяких випадках в'являється мартенсит (α' -Fe).

З метою скорочення втрат вуглецю частками СЧ в процесі напильнення, покращення умов формування покриттів за рахунок екзотермічних реакцій взаємодії і для зменшення ступеню окислення створені плаковані КП з оболонками із міді, алюмінію і нікелю (табл.2), концентрації яких вибирали на основі теоретичного аналізу їх впливу на фазовий склад і структуру СЧ.

Показано, що процес ППН порошку (СЧ)-Al супроводжується ефектом екзотермічної взаємодії його компонентів між собою (з утворенням інтерметаліду Fe₃Al) і з середовищем напильнення (з утворенням Al₂O₃) внаслідок чого підвищується температура напилуваних часток і росте розмір площі їх контакту з поверхнею, що сприяє формуванню більш щільних покриттів. Встановлено, що плакування часток СЧ алюмінієм, міддю і нікелем зменшує відносне окислення покриттів на 50...55 %, відносне вигорання вуглецю у випадку напильнення КП (СЧ)-Cu зменшується на 8...10 %. Загальний вміст кисню в покриттях із композиційного порошку (СЧ)-Al знижується в 1,2 рази.

В результаті рентгеноструктурних досліджень встановлено, що плакування часток СЧ міддю в кількості 8,3 мас. % за рахунок відносного зменшення вигорання вуглецю в процесі напильнення приводить до підвищення вмісту ϵ -фази в структурі покриттів (табл.2). Інтенсивний тепловий вплив часток КП (СЧ)-Al на вже сформовані шари покриття за рахунок екзотермічного ефекту взаємодії приводить до розпаду ϵ -фази по схемі ϵ -Fe + α -Fe + Fe₃C і підвищення вмісту цементиту в структурі.

Вибір компонентів ПС проводили на основі попереднього теоретичного аналізу. З метою зниження рівня залишкових напружень в покриттях із СЧ були розроблені ПС з добавками аморфізуючого сплаву евтектичного складу Fe-B (промислова марка ПГ-Ж5) і бронзи, а для підвищення зно-

остійкості покриттів при різних видах вношування - з добавками магнетиту (Fe_3O_4), сплаву ПП-Ж5 та подвійного карбіду титану і хрому ((Ti,Cr)C) (табл.2).

Встановлено, що матричними фазами в структурі ППШ із ПС є ферит і аустенит, а зміцнюючими - бориди заліза типу Fe_2B і Fe_3B , а також карбідні включення. ППШ із ПС з добавками магнетиту характеризуються високим вмістом крихких ферооксидних прошарків із Fe_3O_4 і Fe_2O_3 , що, як виявлено за допомогою металографічних досліджень, представлені темними участками, які займають значну частину площі і мають мікротвердість в діапазоні 4000...5500 Мпа і 9270 МПа. Встановлено, що в структурі ППШ,

Таблиця 2

Характеристика ППШ (без о.о.) із порошків на основі стружки СЧ

№ п/п	Напилований матеріал (% мас.)	Фазовий склад	Мікротвердість, МПа	Міцність зчеплення, МПа
1	СЧ1	γ -Fe; α -Fe; Fe_3C ; ϵ -Fe (сл)	2100...7110	30
2	СЧ2	α -Fe; α' -Fe; γ -Fe Fe_3C ; ϵ -Fe (сл)	2480...8800	30
3	СЧ3	γ -Fe; ϵ -Fe; α -Fe; Fe_3C (сл)	3900...9200	32
4	(СЧ1)-5,3А1	γ -Fe; Fe_3C ; α -Fe; ϵ -Fe (сл)	2570...8950	52
5	(СЧ1)-8,3Cu	ϵ -Fe; γ -Fe; α -Fe; Fe_3C (сл)	2540...9100	44
6	(СЧ1)-10,2Ni	γ -Fe; α -Fe; Fe_3C ; ϵ -Fe (сл)	2100...4410	23
7	СЧ1 + 25 ПП-Ж5	α -Fe; γ -Fe; Fe_2B ; Fe_3B	2440...10720	55
8	СЧ1 + 50 ПП-Ж5	α -Fe; γ -Fe; Fe_2B ; Fe_3B	3410...12830	60
9	СЧ1 + 25 ПП-Ж5 + 15 бронзи	γ -Fe; α -Fe; Fe_2B Fe_3B ; Fe_3C ; Cu	2320...12830	50
10	СЧ1 + 25 ПП-Ж5 + 25 Fe_3O_4	α -Fe; γ -Fe; Fe_3B Fe_3O_4 ; Fe_2O_3	3030...12830	42
11	СЧ1 + 25 (Ti,Cr)C	γ -Fe; α -Fe; TiC; Fe_3C	2100...14610	38

із ПС з добавками (Ti,Cr)C карбіди розподілені в аустеніто-феритній матриці у вигляді дисперсних сферичних включень різних розмірів, що мають мікротвердість в діапазоні 12400...14610 МПа. ППШ із роз-

роблених КП і ПС мають щільну будову з незначним вмістом пор.

Встановлено, що в покриттях із СЧ, які напилені без о.о. і характеризуються низьким вмістом ϵ -фази, залишкові напруження (σ_3) стиску формуються тільки на товщині до 100 мкм, а при її збільшенні до 400 мкм σ_3 переходять в розтягуючі. Застосування о.о. внаслідок збільшення в структурі кількості ϵ -фази приводить до того, що знак σ_3 змінюється практично по всій товщині покриттів, а величина не перевищує $-(20)$ МПа. В порівнянні з покриттями із СЧ, нанесеними без о.о., напилення ПС, що містить сплав ПГ-Ж5, за рахунок взаємної компенсації напружень протилежних знаків приводить до зниження рівня розтягуючих σ_3 на 20...40 % по всій товщині покриттів. Ефект від добавки в таку ПС бронзи на σ_3 менш помітний, однак позитивним є факт різкого зменшення розтягуючих σ_3 в поверхневих шарах, що є виливним з точки зору запобігання утворення мікротріщин.

Виявлено, що збільшення кількості ϵ -фази в покриттях із СЧ, напилених при о.о., внаслідок переходу розтягуючих залишкових напружень в стискаючі невисокого рівня дозволяє підвищити міцність зчеплення (σ_{34}) покриттів з основою на 20 %. Перегрів покриття у випадку зменшення L до 130 мм при відсутності о.о. приводить до зниження σ_{34} на 40...45 %. Понижені розтягуючі σ_3 в покриттях із ПС з добавками сплаву ПГ-Ж5 сприяють зростанню їх σ_{34} в 1,8...2 рази (табл.2). Добавки бронзи чи магнетиту в ПС СЧ + 25 ПГ-Ж5 не приводять до підвищення σ_{34} . Введення (Ti,Cr)C в СЧ за рахунок підвищення механічної міцності покриттів приводить до збільшення їх σ_{34} на 20...25 %. В порівнянні з покриттями із СЧ міцність зчеплення покриттів із КП (СЧ)-Al і (СЧ)-Cu підвищується відповідно в 1,7 і 1,5 раза.

Особливістю досліджуваних покриттів є значний розбіг значень мікротвердості (H_n) (табл.2), що пов'язано з їх гетерогенністю. Серед ППШ із нелегованого СЧ найбільші значення мікротвердості характерні для тих, які одержані із порошків, що характеризуються найменшими втратами вуглецю в процесі переробки стружки. Підвищення H_n покриттів із КП (СЧ)-Al пов'язане із збільшенням в структурі Fe_3C , а покриттів із КП (СЧ)-Cu - з формуванням ϵ -фази. В покриттях із ПС H_n різко зростає за рахунок утворення в структурі боридів заліза чи карбідів.

Встановлено, що покриття із СЧ зберігають значення мікротвердості на рівні 3000...4000 МПа при нагріванні від 20 до 500 °С, а підвищення вмісту ϵ -фази в структурі, за рахунок о.о., приводить до підвищення їх H_n в цьому температурному інтервалі на 7...15 %. По параметру "гарячої" мікротвердості (до температур 400 °С) такі покриття наближаються до кобальтового сплаву Стелліт N6 (Co-Cr-Ni-W), що є типовим зносостійким матеріалом при експлуатації в умовах підвищених температур.

Досліджено, що термосробка протягом 30 хв при температурах 300 і 400 °С приводить до підвищення H_v покриттів із СЧ на 30 %, а при температурі 500 °С - майже в 2 рази, що пояснюється, як і при "гарячій" мікротвердості, поетапним розпадом ϵ -фази і зміцненням покриттів дрібнодисперсним продуктом розпаду - цементитом.

За результатами випробовувань в умовах газоабразивного зношування встановлено, що в порівнянні з покриттями із нелегованого СЧ, нанесених без о.о., зносостійкість покриттів із ПС з

добавками сплаву ПГ-Ж5 збільшується в усьому діапазоні кутів атаки в середньому в 2,3...2,5 рази, бронзи - в 1,7 рази, магнетиту - в 1,4 рази, а зносостійкість ПГПШ із КП (СЧ)-Al 1 (СЧ)-Cu - в 1,8 і 1,6 рази, відповідно. В даних умовах випробовували покриття із розроблених ПС і КП в 1,2...2,2 рази перевищують плазмові покриття із нікелевого сплаву ПГ-10Н-01 (Ni-Cr-B-Si), але поступаються ненапиленій сталі 45, хоча і не дуже значно (рис.2,а). Найбільш стабільні величини зносу у покриттів із ПС з добавками сплаву ПГ-Ж5, а також бронзи, і при малих і середніх кутах атаки абразиву знаходяться на рівні величини зносу ненапиленої сталі 45. Встановлено, що збільшення вмісту ϵ -фази в структурі за рахунок о.о. в процесі ПГПШ дозволяє підвищити газоабразивну зносостійкість покриттів із СЧ в середньому в 5 разів в порівнянні з неохолодженими та в 1,9 і 4,3 рази в порівнянні із сталлю 45 і плазмовими покриттями із сплаву ПГ-10Н-01, відповідно.

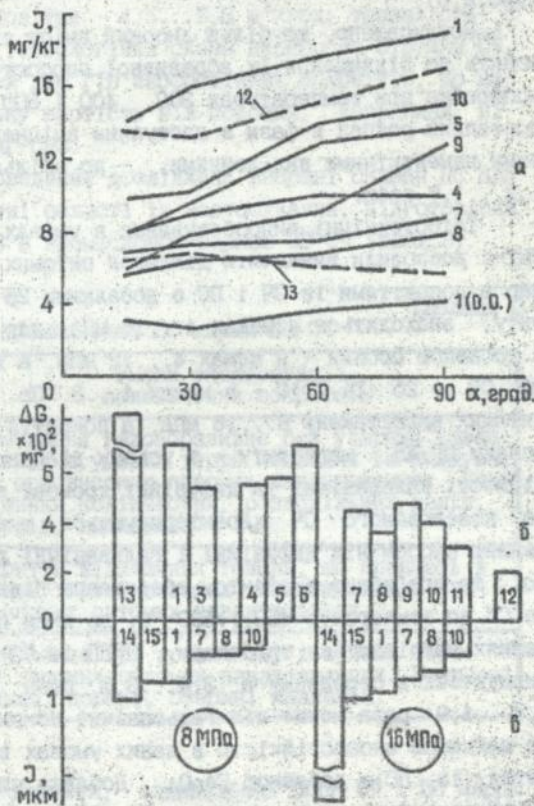


Рис.2. Зносостійкість покриттів при газоабразивному (а), абразивному зношуванні (б) і терті ковзання (в): 1...11 - згідно табл.2; 12 - ПГ-10Н-01; 13 - сталь 45; 14 - дифузійні (із Cr_7C_3); 15 - гальванічні хромові.

газоабразивну зносостійкість покриттів із СЧ в середньому в 5 разів в порівнянні з неохолодженими та в 1,9 і 4,3 рази в порівнянні із сталлю 45 і плазмовими покриттями із сплаву ПГ-10Н-01, відповідно.

Випробовування в умовах тертя з резиновим кільцем при подачі абразиву показали, що покриття із ПС і КП, нанесені без о.о., по зносостійкості в 1,4...3,4 раза переважають трюмооброблену до НRC 46...52 сталь 45, а покриття із ПС СЧ + (Ti,Cr)C за рахунок поєднання пластичності ферито-аустенітної матриці в підвищеними характеристиками міцності карбідних включень наближається до оплавленого покриття із нікелевого сплаву ПП-10Н-01, що є типовим абразивостійким покриттям (рис.2,б).

Встановлено, що більш високий вміст ϵ -фази в покриттях із СЧ приводить до підвищення їх абразивної зносостійкості на 28...30 %, а термообробка при температурах 300, 400 і 500 °С, при яких відбувається посталпний розпад ϵ -фази в наступним зміцненням покриття дрібнодисперсними цементитними виділеннями, - до збільшення їх зносостійкості в 1,2...1,7 раза.

Триботехнічні випробовування в умовах тертя ковзання на машині УМТ-1 дозволили визначити діапазон питомих навантажень, який для трибопар з покриттями із СЧ і ПС з добавками 25 і 50 % сплаву ПП-Ж5, магнетиту, знаходиться в межах 4...16 МПа, для трибопарі з покриттям із ПС з добавкою бронзи - в межах 4...12 МПа, а для трибопарі з покриттям із ПС СЧ + 25 (Ti,Cr)C - в межах 4...8 МПа. Покриття із СЧ в діапазоні питомих навантажень 8...16 МПа, а покриття із ПС з добавками 25 і 50 % сплаву ПП-Ж5, магнетиту - в усьому діапазоні, переважають по зносостійкості гальванічні та дифузійні хромові покриття (рис.2,в). Покриття із нелегированого СЧ характеризуються в середньому в 1,9 і 1,15 раза меншим зносом ніж дифузійні і гальванічні хромові покриття, відповідно, що пов'язано в ефектом збереження підвищеної твердості покриттями із СЧ до температур 450...500 °С, до яких при високих питомих навантаженнях нагріваються трибопарі. ППП із ПС з добавками 25 і 50 % ПП-Ж5 зношуються в середньому в 3,4...3,8 раза менше ніж дифузійні і в 1,7...1,9 раза менше ніж гальванічні покриття із хрому. Встановлено, що найвищою зносостійкістю в даних умовах випробовувань володіють покриття із ПС з добавкою Fe₃O₄. Добавка магнетиту в ПС із СЧ і сплаву ПП-Ж5 приводить до зниження на 8...30 % коефіцієнту тертя за рахунок ефекту сухого змащування і, внаслідок цього, до значного підвищення зносостійкості, котра в 2,4 і 5,1 раза переважає зносостійкість відповідно гальванічних і дифузійних хромових покриттів.

В результаті випробовувань покриттів із СЧ на машині МТ-22М встановлено, що по зносостійкості вони переважають відливки аналогічного хімічного складу в 3,1...3,5 раза і характеризуються в 2,3 і 1,15 раза більш високими триботехнічними характеристиками порівняно з покриттями із нікелевих сплавів відповідно ПН5Т45 (Ni-Ti) і ПП-СРЗ (Ni-Cr-B-Si).

Встановлено, що найбільш продуктивним обладнанням для подрібнення стружки СЧ (20...26 кг/год порошку фракцією -160+40 мкм), котре забезпечує мінімальне викришування вуглецю, є конусно-інерціна та молоткова дробарки, які також характеризуються найнижчими показниками питомих витрат електроенергії по готовому продукті, а оптимальними режимами повітряної класифікації, що забезпечують ефективний розподіл по фракціях та необхідний вміст вуглецю в порошках після подрібнення є: маса завантаження - 2 кг; витрата повітря - 4,5...5,0 м³/год; тривалість- 5 хв. Розроблена раціональна технологічна схема переробки стружки СЧ, яка дозволяє одержувати порошки для ГТН зносостійких покриттів, що мають в 15...20 разів більш низьку вартість ніж порошки, наприклад, нікелевих сплавів ПГ-10Н-01 чи ПГ-СРЗ.

На основі результатів проведених досліджень вибрані склади ПС для серійного виробництва, визначені області їх застосування, підготовлена технічна документація на ці ПС в промисловою маркою ПС-СЧ (табл.3).

Характеристика промислових ПС марки ПС-СЧ

Таблиця 3

Марка ПС	Склад, % мас.	Умови експлуатації, призначення покриттів
ПС-СЧ-1	СЧ + 25 ПГ-Ж5	Зношування газообразне без ударних навантажень; в умовах тертя ковзання із змащуванням при високих питомих навантаженнях. Опорні шийки колінчастих, розподільних валів, роторів, шпінделів.
ПС-СЧ-2	СЧ + 50 ПГ-Ж5	
ПС-СЧ-3	СЧ + 25 ПГ-Ж5 + 15 бронзи	Покриття підвищених товщин, що працюють в умовах тертя ковзання із змащуванням при невисоких питомих навантаженнях.
ПС-СЧ-4	СЧ + 25 ПГ-Ж5 + 25 Fe ₃ O ₄	Зношування при граничному і сухому терті при високих питомих навантаженнях. Поршневі кільця, поршні, стержні клапанів.

Виробничі випробовування деталей, відновлених ПГПН СЧ і ПС марок ПС-СЧ-1, ПС-СЧ-2, ПС-СЧ-3 та ПС-СЧ-4 показали, що ресурс роботи валів масляних насосів двигунів СМД-14, колінчастих валів двигунів ВАЗ-2101 та М-412, розподільних валів двигунів ЗІЛ-508.10, барабанів гальмів трактора Т-150К та клапанів газорозподільного механізму двигуна ЗМЗ-53 підвищився відповідно в 1,5...1,75, 1,1...1,4, 1,2...1,6, 1,5...1,7 та 1,2...1,3 раза.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Науково обгрунтовано і експериментально досліджено ефективність застосування порошоків, одержаних із стружки СЧ, для ГТН вносостійких покриттів. Встановлено вплив методів переробки стружки на хімічний склад, структуру і властивості одержуваних порошоків і показано, що найбільш придатними є методи, які характеризуються найменшими втратами вуглецю в процесі одержання порошоків для ГТН.

2. Розроблено математичну модель охолодження напилених часток і вивчено термічні умови формування метастабільних мікрокристалічних фаз в покриттях із порошоків сплавів Fe-C-Si в залежності від умов ГТН. Теоретично показано, що формування метастабільної ϵ -фази в структурі найбільш реальне при напиленні порошоків з розміром часток до 160 мкм і вмістом вуглецю не меншим за 2,5 мас. %, а засобом відвернення розпаду ϵ -фази при нагріванні покриття в процесі ГТН є охолодження основи.

3. Експериментально встановлено, що підвищення вмісту ϵ -фази в структурі покриттів із порошоків СЧ забезпечується оптимальними з точки зору максимального коефіцієнту використання матеріалу режими ПТПН і застосуванням охолодження основи, а викришування графіту при подрібненні стружки і його подальше згорання при напиленні приводить до зменшення кількості ϵ -фази з одночасним підвищенням кількості аустеніту, а в деяких випадках - до появи мартенситу.

4. Вперше встановлено, що збільшення в структурі покриттів із СЧ вмісту ϵ -фази приводить до переходу в них розтягуючих залишкових напружень в стискаючі невисокого рівня і збільшення за рахунок цього в 1,2 рази їх міцності зчеплення з основою, сприяє збільшенню мікротвердості покриттів в діалазоні температур 20...500 °С на 7...15 %, підвищенню їх газоабразивної зносостійкості в середньому в 5 разів, а абразивної - на 28...30 %.

5. Експериментально встановлено, що плакування часток СЧ міддю за рахунок відносного зменшення на 8...10 % вигорання вуглецю в процесі ПТПН сприяє підвищенню вмісту ϵ -фази в структурі покриттів, а інтенсивний тепловий вплив часток КП (СЧ)-Al на вже зформовані шари покриття за рахунок екзотермічного ефекту взаємодії приводить до розпаду ϵ -фази і підвищення вмісту цементиту в структурі.

6. Показано, що покриття із ПС на основі СЧ характеризуються гетерогенною структурою. Матричними фазами в них є α -Fe і γ -Fe, а зміцнюючими - дрібнодисперсні бориди заліза типу Fe₂B і Fe₃B та карбідні включення. Покриття із ПС з добавками магнетиту характеризуються високим вмістом крихких ферооксидних прошарків із Fe₃O₄ і Fe₂O₃.

7. Встановлено, що добавки сплаву ПП-Ж5 і бронзи до СЧ сприяють зменшенню на 20...40 % рівня розтягуючих залишкових напружень в пок-

риттях. Показано, що ПГПІ із розроблених КП і ПС, нанесені без охолодження, характеризуються високими значеннями міцності зчеплення з основою (40...60 МПа), по газоабразивній зносостійкості в 1,2...2,2 рази перевищують плазмові покриття із нікелевого сплаву ПГ-10Н-01, а по абразивній - в 1,4...3,4 термооброблену сталь 45.

8. Показано, що в умовах тертя ковзання при питомих навантаженнях до 16 МПа покриття із СЧ і ПС з добавками сплаву ПГ-Ж5, магнетиту, нанесені без охолодження, переважають по зносостійкості гальванічні та дифузійні хромові покриття відповідно в 1,15...2,4 та 1,9...5,1 рази, а зносостійкість покриттів із СЧ, крім того, вища за зносостійкість плазмових покриттів із нікелевих сплавів ПН55Т45 і ПГ-СРЗ відповідно в 2,3 : 1,15 рази.

9. Встановлено, що ПГПН порошоків на основі стружки СЧ дозволяє підвищити зносостійкість колінчастих валів двигунів ВАЗ-2101 і М-412, валів масляних насосів двигунів СМД-14, розподільних валів двигунів ЗІЛ-508.10, клапанів газорозподільного механізму двигуна ЗМЗ-53 і барабанів гальмів трактора Т-150К відповідно в 1,1...1,4, 1,5...1,75, 1,2...1,6, 1,2...1,3 і 1,5...1,7 рази.

Основні результати дисертації висвітлені в роботах:

1. Получение порошков для газотермического напыления из стружки серого чугуна / Ю.С. Борисов, В.Н. Коржик, М.Т. Панько, А.Л. Борисова // Состояние и перспективы восстановления и упрочнения деталей машин: Матер. научн.-практ. конф. - М.: О-во "Знание", 1994. - Сб.2. - С.101-105

2. Износостойкие газотермические покрытия из стружечных отходов серого чугуна / Ю.С. Борисов, В.Н. Коржик, М.Т. Панько, В.Р. Калиновский // Мотортехнология 94: Тез. докл. конф. - К.: Моторинфо, 1994. - №3. - С.60.

3. Разработка процесса получения порошков для газотермического напыления из стружки серого чугуна / Ю.С. Борисов, В.Н. Коржик, М.Т. Панько, М.Л. Князь // Автомат. сварка. - 1995. - №6. - С. 7-12.

4. Применение стружковых отходов серого чугуна для газотермического напыления износостойких покрытий / Ю.С. Борисов, В.Н. Коржик, М.Т. Панько, М.Л. Князь // Ресурсо- и энергосберегающие технологии в машиностроении: Тез. докл. конф. - К.: УДЭНТЗ, 1995. - С. 45.

5. Борисов Ю.С., Коржик В.Н., Панько М.Т. Разработка технологии плазменного напыления порошков из стружки серого чугуна // Лазерные и физико-технические методы обработки материалов: Тез. докл. междунар. конф. - К.: УДЭНТЗ, 1995. - С. 10.

6. Structure and properties of thermal sprayed coatings of powders Fe-C-Si/ Yu. Borisov, A. Borisova, V. Korzhyk, M. Panko // Therm. Spray. Conf. TS'96. - Essen, 1996. - P. 106-109.

7. Композиционный порошок "серый чугун - медь" для плазменного напыления износостойких покрытий / Ю.С. Борисов, М.Т. Панько, В.Н. Коржик, М.Ф. Дуруль // Ресурсо-, энергосберегающие и экологически чистые технологии в производстве деталей из композиционных материалов: Матер. конф. - К.: УДЭНТЗ, 1996. - С. 29.

8. Разработка композиционного порошка "серый чугун - алюминий" для газотермического напыления / Ю.С. Борисов, М.Т. Панько, В.И. Шаповал, А.М. Гудыменко // Порошковая металлургия. - 1996. - (в печати).

9. Порошкова суміш для газотермічного напылення /Позитивне рішення по заявці на винахід 93005889 від 29.07.93. // В.М. Коржик, Ю.С. Борисов, М.Т. Панько та ін.

10. Порошкова суміш для газотермічного напылення /Позитивне рішення по заявці на винахід 93005891 від 29.07.93. // В.М. Коржик, Ю.С. Борисов, М.Т. Панько та ін.

ОСОБИСТЫЙ ВКЛАД АВТОРА

В [1, 3] показано можливість одержання із чавунної стружки порошоків, придатних для ГТН. В [3] проведено аналіз впливу методів переробки стружки на склад, структуру і властивості порошоків, показано можливість утворення в структурі покриттів метастабільних фаз. В [6] теоретично і експериментально визначено умови ГТН сплавів Fe-C-Si, що забезпечують одержання покриттів з метастабільною структурою. В [5] проведено вибір раціональних режимів ППН порошоків сірого чавуну з використанням математичного планування експерименту. В [9, 10] запропоновано нові склади порошоків: сумішей для ГТН на основі порошку сірого чавуну із стружки. В [2, 4] показано високий рівень зносостійкості покриттів із розроблених порошоків і приведено приклади їх промислового застосування. В [7, 8] досліджено вплив плакування порошоків сірого чавуну алюмінієм і міддю на структуру і властивості покриттів.

АННОТАЦІЯ

Панько М.Т. "Разработка технологии воздушно-газового плазменного напыления износостойких покрытий из порошков на основе стружки серого чугуна", рукопись диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности "Технология и оборудование для сварки и родственных процессов", Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев, 1996 г. Защищаются экспериментальные данные по влиянию условий переработки стружки серого чугуна на изменение состава, структуру и свойства порошков для ГТН, теоретические и экспериментальные данные по распределению тепловых процессов при формировании покрытий и их влиянию на формирование метастабильных микрокристаллических фаз в покрытиях из серого чугуна, а также закономерности влияния фазового состава и структуры покрытий из серого чугуна на прочность сцепления с основой, микротвердость, износостойкость при равных видах изнашивания, новые практические решения по применению покрытий из разработанных порошков марки ПС-СЧ.

Ключевые слова: воздушно-газовое плазменное напыление, серый чугун, стружка, метастабильная микрокристаллическая фаза, износостойкость.

Panko M.T. "DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY FOR AIR-GAS PLASMA SPRAYING OF WEAR-RESISTANT COATINGS FROM POWDERS BASED ON GREY CAST IRON CHIP", manuscript of the thesis for the candidate of technical sciences degree in speciality "Technology and Equipment for Welding and Related Processes", the E.O.Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, 1996. Defended are experimental data on the effect of conditions for processing the grey cast iron chip upon variations in composition, structure and properties of thermal spraying powders, theoretical and experimental data on distribution of thermal processes during formation of coatings and their effect on formation of metastable microcrystalline phases in the grey cast iron coatings, as well as principles of the effect of the phase composition and structure of the grey cast iron coatings on strength of adhesion to a substrate, microhardness and wear resistance under various types of wear, new practical solutions for the application of the coatings sprayed from the developed powders of grade PS-SCh.

Keywords: air-gas plasma spraying, grey cast iron, chip, metastable microcrystalline phase, wear resistance.

Підп. до друку 05.05.96. Формат 60x84/16. Пап. офс. № 2. Обс. друк.
Ум. друк. арк. 0,93. Ум. фарбо-відб. 1,16. Обл.-вид. арк. 0,96.
Тираж 102 прим. Зам. 6-102.

ІЕС Ім. Е.О.Патона, 252650 Київ 5, МСП, вул. Горького, 69
ВОО ІЕС Ім. Е.О.Патона, 252650 Київ 5, МСП, вул. Горького, 69

І. В. Стефаніна
України

446725

AB 34.743

AB 34.743