

О.П. Шиліна, канд. техн. наук,  
В.І. Савуляк, д-р техн. наук,  
Ж.П. Дусанюк, канд. техн. наук,  
В.П. Перегончук

Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна

## ГАЗОТЕРМІЧНЕ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНІ ПОРОШКОВОЮ КОМПОЗИЦІЄЮ НА ОСНОВІ БІЛОГО ЧАВУНУ

## GAS-THERMAL STRENGTHENING OF A SURFACE BY THE POWDERED COMPOSITION ON THE BASIS OF WHITE CAST IRON

*Представлено дослідження стабільності та зносостійкості поверхневих шарів, нанесених порошковими композиціями на основі білого чавуну газотермічним напилюванням та, зокрема, стабільності цементиту в поверхневих напилених шарах. Внаслідок екзотермічних реакцій у перебігу процесу напилювання досягається оптимальна об'ємна структура, у якій тверді зони, що складаються з більш крихкого матеріалу, ізольовані одна від однієї, а між ними розташована матриця з в'язкого матеріалу — виконується так званий принцип Шарпі–Бочвара.*

*Ключові слова: порошкові композиції; газотермічне напилювання; цементит; екзотермічні реакції; карбідні включення; перлітна основа; принцип Шарпі–Бочвара.*

### Вступ

Важливою народногосподарською проблемою є захист поверхонь деталей від робочого середовища і, за рахунок цього, збільшення терміну їх експлуатації. Шляхом вирішення проблеми може бути поєднання саморозповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС) і газополуменевого поверхневого зміцнення. Використання СВС-процесів дозволяє створити умови для реалізації технологій, які важкодоступні або неможливі у інших технологіях. Це високі температури (вище 3000 °C), локалізація тепловиділення на окремих ділянках, поєднання процесів синтезу хімічних сполук заданого призначення з структуроутворенням тощо.

Метою роботи є дослідження стабільності та зносостійкості поверхневих шарів, нанесених порошковими композиціями на основі білого чавуну газотермічним напилюванням та, зокрема, стабільність цементиту в поверхневих напилених шарах.

Науково-технічною задачею, яка вирішується в даній роботі, є створення порошкової композиції для газополуменевого напилювання з метою підвищення твердості покриття та адгезійної міцності зчеплення з основою.

### Основні результати досліджень

Основою композиції є порошок білого чавуну, при цьому вміст компонентів у відсотках за масою є таким: хрому — 1,5–1,7 %; алюмінію — 9,8–10,2 %; бору — 5,9–6,3 %; білий чавун — решта.

Компоненти порошкової суміші (хром, алюміній, бор, білий чавун) попередньо подрібнюють до стану,

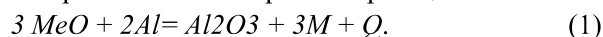
який забезпечує вміст пилоподібних частинок 20 % від загальної маси. Усі компоненти шихти просіюють крізь сито з розміром комірки 0,045 мм. Безпосередньо перед напилюванням готова суміш просушується при температурі 130–170 °C.

Приклад конкретного виконання: палик для газополуменевого напилювання [4] ГН-3; середній розмір частинок порошку — 45–90 мкм; витрати порошку — 3–4 кг/год.; витрати ацетилену — 0,9 кг/год.; кисню — 1,8 кг/год.; дистанція напилювання 0,06–0,08 м; підложка зі сталі Ст 3 [8]. При товщині напилюваного шару 2,0–2,5 мм досягається максимальна мікротвердість покриття [3,6] за рахунок фізико-хімічної взаємодії всіх елементів порошку.

У результаті взаємодії формується особлива структура покриття з складнолегованого розчину на основі білого чавуну, що має вміст вуглецю 2,4–2,8%, якій притаманні високі механічні властивості, а також здатність до ефективної взаємодії елементів матеріалу основи та покриття [5,7].

Підвищення ефективності застосування порошку на основі білого чавуну для газополуменевого напилювання досягається за рахунок оптимальної пропорції усіх складових компонентів порошку та отримання мікротвердості покриття не менше 6500–6700 МПа та міцністю зчеплення з основою 65–75 МПа.

Введення у суміш алюмінію у кількості 9,8–10,2% сприяє протіканню екзотермічних реакцій за схемою



де MeO — оксид металу, а Q — теплова енергія, яка виділяється при проходженні реакції.

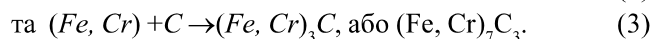
Виділення тепла внаслідок перебігу таких реакцій у слабоокислювальній атмосфері продуктів згорання повітря з ацетиленом сприяє підвищенню температури напилюваних часток і, як наслідок, підвищенню міцності зчеплення напилених покриттів з основою. Крім того, оксид  $Al_2O_3$ , що є результатом таких реакцій, являє собою щільну плівку, яка розміщуючись на поверхні напилюваних часток, перешкоджає насиченню матеріалу частки під час її польоту до основи газами з оточуючої атмосфери.

З одного боку, алюміній відомий як елемент, що розширює область  $\alpha - Fe$ , з іншого боку в такий, що концентрується у твердому розчині при рівновазі ферит-цементит, або аустеніт-цементит. Однак при вмісті алюмінію більше 2% у структурі відбувається  $\gamma$ -фаза. Це можливо, коли відношення кількості атомів  $Fe$  та  $Al$  в аустеніті наближається як 3:1, і  $\gamma$ -фаза впорядковується та переходить у сполуку  $Fe_3AlC_x$ . У чавунах ця фаза є у дійсності впорядкованим твердим розчином заміщення  $Fe-Al$  у гранецентрованої кубічної ґратки (г.ц.к.), додатково насичується за типом розчинів проникнення з великою кількістю вуглецю [2] (до 4 %, що повинно відповідати стехіометричній формулі  $Fe_3AlC_x$ ).

Зв'язки метал-вуглець у ґратці  $\gamma$ -фази дуже міцні, тому вона має переважно карбідний характер. Фіксування вуглецю  $\gamma$ -фазою викликає зниження термодинамічної активності цього елемента. Тобто в цій області алюміній виступає не як  $\alpha$ -стабілізатор, а як своєрідний  $\gamma$ -стабілізатор, і не як графітізатор, а як елемент, що перешкоджає графітізації.

При вищому вмісті алюмінію порушується умова для утворення  $\gamma$ -фази, знову розширюється область  $\alpha$ -розчину і сплави знову стають схильними до графітізації. З подальшим підвищенням вмісту алюмінію описане явище повторюється у зв'язку з утворенням нових сполук ( $FeAl$ ,  $Al_4C_3$ ) [2].

Екзотермічну реакцію, яка ініціюється у суміші білого чавуну та хрому під впливом тепла від газополуменового пальника, можна записати так:



Реакція (2) слабо екзотермічна, нелегований цементит є нестабільним карбідом, схильним до розпаду (графітізації) та утворення легованого цементиту або спеціального карбіду. Реакція (3) більш екзотермічна і має тим більше тепловиділення, чим більший вміст хрому та вуглецю у білому чавуні. Залізо, що вивільняється в процесі реакції, утворює леговану хромом металеву матрицю, в якій розташовуються міцно зчеплені з основою високотверді карбіди.

Пояснюється це тим, що швидкість хімічної реакції термореагуючої порошкової суміші завдяки СВС-процесу, що саморозповсюджується та випереджає технологічну швидкість джерела тепла, з якою б швидкістю не переміщувався пальник відносно поверхні деталі. В результаті додаткового теплового ефекту від СВС-реакції поверхневі та внутрішні

шари металу встигають розігріватися до більш високих температур. Враховуючі попередній нагрів деталей до 400-450 °С, додаткове підвищення температури на 300-325 °С переводить метал у область фазових перетворень, які в цих умовах випереджають газополуменовий перепплав. Це сприяє зменшенню внутрішніх напружень у порівнянні з аустенітоутворенням при технологічному нагріві без термореагуючого порошку, причому за час, на який СВС-реакція випереджає газополуменовий перепплав, повніше встигає пройти і дифузія хрому, алюмінію та бору в наплавляемій суміші, що сприяє рівномірному розподіленню елементів у металевій матриці та підвищенню зчеплення порошкової суміші з основою.

Бор введено для підвищення зносостійкості напиленого шару [6,7].

Приготування шліфів для проведення металографічних дослідів здійснювалось за стандартними методиками. Травлення шліфів проводили розчином хлористого заліза ( $FeCl_3 + 6H_2O$ ).

Металографічні дослідження отриманих зразків проводились на оптичних мікроскопах. ДюрOMETричні випробування виконувались на приладі ПМТ-3 методом вдавлювання алмазної пірамідки під навантаженням від 0,5 до 2 Н. Як інструмент для вдавлювання використовувалась алмазна пірамідка з квадратною основою та кутом при вершині між протилежними гранями 136°.

На рисунку 1 показано мікроструктуру напиленого поверхні порошком на основі білого чавуну.

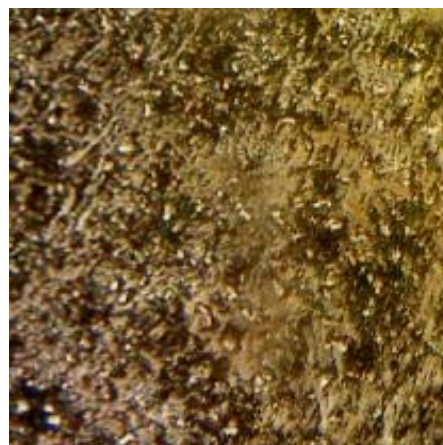


Рисунок 1 — Мікроструктура напиленого шару (x100)

Металографічний аналіз показав, що в процесі напилювання під впливом теплоти газополуменового струменя відбулося утворення поверхневого напиленого шару з рівномірно розташованими по полю мікрошліфа надлишковими складнолегованими карбідними включеннями в перлітній основі. Присутність хрому, бору та алюмінію в напиленому шарі надає йому високої зносостійкості. Такий тип мікроструктури відповідає принципу Шарпі-Бочвара.

## Висновки

Аналіз отриманих результатів показав:

- порошкова композиція на основі білого чавуну упродовж напилювання поверхневих шарів створює покриття з заданими експлуатаційними властивостями внаслідок більш рівномірного об'ємного нагрівання покриття протягом перебігу екзотермічних реакцій в процесі напилювання;

- оброблена поверхня залишається гладенькою, незалежно від того, що вона тимчасово переходить у твердо-рідкий стан;

- присутність алюмінію в порошковій суміші утворює фазу, що є у дійсності впорядкованим твердим розчином заміщення Fe-Al градецентрованої кубічної ґратки, додатково насичується за типом розчинів проникнення з великою кількістю вуглецю (до 4 %, що повинно відповідати стехіометричній формулі  $Fe_3AlC_x$ );

- досягається оптимальна об'ємна структура, у якій тверді зони, що складаються з більш крихкого матеріалу, ізольовані одна від однієї, а між ними розташована матриця з в'язкого матеріалу — виконується принцип Шарпі–Бочвара;

- підвищення ефективності застосування порошку на основі білого чавуну для газополуменевого напилювання, в порівнянні з порошками на основі заліза, досягається за рахунок здешевлення порошкової суміші.

## Література

1. Патент 75140, Україна, МПКВ22F 9/00. Порошок для газополуменевого напилення / В.І. Савуляк, О.П. Шилина, В.П. Перегончук. — Заявл. 18.04.2012; Опубл. 26.11.2012. — Бюл. № 22
2. Жуков, А.А. Геометрическая термодинамика сплавов железа. - М.: Металлургия, 1971. — 272 с.
3. Корж, В.М. Нанесения покрытия / В.М. Корж, В.Д. Кузнецов, Ю.С. Борисов, К.А. Ющенко — К.: Арістей, 2005. — 204 с.
4. Газотермическое напыление покрытий: сборник руководящих технических материалов. — К.: ИЭС им.Е.О. Патона, 1993. — 176 с.
5. ГОСТ 28076-89. Газотермическое напыление. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 15 с.
6. Кузнецов, В.Д. Фізико-хімічні основи створення покриттів: навч. посібн / В.Д. Кузнецов, В.М. Пашченко. — К.: НМЦ ВО, 1999. — 176 с.
7. Кузнецов, В.Д. Фізико-хімічні основи модифікації структури та легування поверхні: навч. посібн. / В.Д. Кузнецов, В.М. Пашченко. — К.: НМЦ ВО, 2000. — 160 с.
8. Витязь, П.А. Теория и практика нанесения защитных покрытий: моногр. / П.А. Витязь, В.С. Ивашко, А.Ф. Илюшенко и др. — Минск: Беларуская наука, 1998. — 383 с.

## References

1. Patent 75140, Ukraine, МПКВ22F 9/00. Poroshok dlya gazopolumenevogo napyleniya / V.I. Savulyak, E.P. Shilina, V.P. Peregonchuk. — Zayavl. 18.04.2012; Opubl. 26.11.2012. — Byul. № 22
2. Zhukov, A.A. Geometrichna termodinamika splaviv gelezha. — M.: Metallurgiya. — 1971. s. 272.
3. Korzh, V.M. Nanesennya pokryttya. / V.M. Korzh, V.D. Kuznetsov, YU.S. Borisov, K.A. Yuschenko. — K.: Aristey, 2005. — 204 s.
4. Gazotermicheskoe napylenie pokrytyi.: sbornik rukovodyaschih tehnikeskikh materialov. — K.: IES im. E.O. Patona, 1993. — 176 s.
5. GOST 28076-89. Gazotermicheskoe napylenie. Terminy i opredeleniya. — M.: Izd-vo standartov, 1989. — 15 s.
6. Kuznetsov, V.D. Fyzyko-himichni osnovy stvo-rennya pokrytivy.: navch. posibnyk. / V.D. Kuznetsov, V.M. Pashchenko. — K.: NMTS VO, 1999. — 176 s.
7. Kuznetsov, V.D. Fyzyko-himichni osnovy modifi-kazii struktury ta leguvannya poverhni.: navch. posibnyk. / V.D. Kuznetsov, V.M. Pashchenko. — K.: NMTS VO, 2000. — 160 s.
8. Vityaz, P.A. Teoriya i praktika naneseniya zachitnysh pokrytyi/: monogr. / P.A. Vityaz, V.S. Ivashko, A.F. Ilyushenko i dr. — Minsk: Belarusskaya nauka, 1998. — 383 s.

Надійшла 14.04.2013

УДК 621.793.7: 669.01.549/2

## ГАЗОТЕРМИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИЕЙ НА ОСНОВЕ БЕЛОГО ЧУГУНА

**Е.П. Шилина, В.И. Савуляк,  
Ж.П. Дусанюк, В.П. Перегончук**

Представлены исследования стабильности и износостойкости поверхностных слоев, нанесенных порошковыми композициями на основе белого чугуна газотермическим напылением и, в частности, стабильность цементита в поверхностных напылённых слоях. В поверхностных слоях во время газотермического напыления формируется особая структура покрытия из сложнотвердого раствора на основе порошка белого чугуна, в котором содержится 2,4-2,8 % углерода, с заданными эксплуатационными характеристиками. Введение в смесь алюминия 9,8-10,2 % способствует протеканию экзотермических реакций. Алюминий известен как элемент, который концентрируется в твердом растворе при равновесии феррит–цементит, или аустенит–цементит с другой стороны. Металлографический анализ показал, что в процессе напыления под действием теплоты газопла-

менного потока возникает поверхностный напылённый слой с равномерно расположенными на поле микрошлифа избыточными сложнолегированными карбидными включениями в перлитной основе. В результате экзотермических реакций в процессе напыления, достигается оптимальная объемная структура, когда твердые зоны, созданные из более хрупкого материала, изолированы один от другого, а между ними матрица из вязкого материала — выполняется так называемый принцип Шарпи–Бочвара.

*Ключевые слова:* порошковые композиции; газотермическое напыление; цементит; экзотермические реакции; карбидные включения; перлитная основа; принцип Шарпи–Бочвара

УДК 621.793.7: 669.01.549/2

#### **GAS-THERMAL STRENGTHENING OF A SURFACE BY THE POWDERED COMPOSITION ON THE BASIS OF WHITE CAST IRON**

**E.P. Shilina, V.I. Savulyak,  
G.P. Dusanyuk, V.P. Peregonchuk**

The paper investigates stability and wear resistance of the surface layers applied by powdered composition

on the basis of white cast iron using gas-thermal spraying and, particularly, stability of cementite in the sprayed surface layer.

During gas-thermal spraying, in the surface layers a special structure of the coating from a complex-alloyed solution based on the powdered white cast iron is formed with carbon content of 2,4-2,8 %, creating with predetermined service characteristics. Introduction of aluminium into the mixture (9,8-10,2 %) facilitates exothermal reactions. Aluminium is known as the element that extends solid solution under the balance of ferrite–cementite or austenite–cementite. Metallographic analysis has shown that during the spraying process under the influence of heat of the gas-flame stream sprayed surface layer with excessive complex-alloyed carbide inclusions in pearlite base, spaced evenly in the microsection field, is created. As a result of exothermal reactions, occurring during the spraying process, optimal bulk structure is obtained, where solid zones, composed from a brittle material, are isolated one from another with a matrix from a viscous material located between them — the so called principle of Charpy-Bochvar holds.

*Key words:* powdered compositions; gas-thermal spraying; cementite; exothermal reactions; carbide inclusions; pearlite base; principle of Charpy–Bochvar.