

## СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ ГАЗОПОЛУМЕНЕВИХ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ПОКРИТТІВ

Глушкова Д.Б.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

*Анотація.* У роботі розглянуті питання формування газополуменевих покриттів з використанням порошків на основі нікелю, які самофлюсуються на деталях циліндро-поршневої групи. Структура покриття багатозфазна. Результати проведених досліджень та промислових випробувань дозволяють рекомендувати покриття для практичного використання.

*Ключові слова:* покриття, оплавлення, напилення, карбідна фаза, мікротвердість.

### Вступ

Висока надійність і довговічність двигуна багато в чому залежать від деталей циліндро-поршневої групи. Це пов'язано з тим, що форсування двигуна призводить до значного збільшення питомих навантажень і температури поршневих кілець, поршня, деталей циліндра, що є причиною утворення тріщин і руйнування деталей. Оскільки зазначені деталі працюють в умовах інтенсивного тертя і зношування, для них необхідно забезпечити високу зносостійкість поверхні.

### Аналіз публікацій

У сучасній практиці замість традиційних методів хіміко-термічної обробки для зміцнення поверхні широко застосовують високотемпературні методи обробки, зокрема, газоплазмове напилення. Процес характеризується високою продуктивністю, простотою, можливістю автоматизації для забезпечення достатньої якості поверхні [1–3].

Для газоплазмового та інших видів напилення найефективніше використання порошків на основі нікелю з додаванням хрому, кремнію, бору та ін. (ПГСПЗ, ПГСП4) [2, 3], які забезпечують високу твердість і зносостійкість поверхні. Згідно з прийнятими стандартами, ці порошки мають забезпечувати твердість наплавленого шару не менше ніж HRC 46,4 для ПГСПЗ і HRC 55,9 для ПГСП4.

### Мета і постановка завдання

У роботі досліджені структурні зміни матеріалу покриттів, нанесених на поршневі кільця із сірого чавуну. Експлуатаційні властивості таких покриттів формуються в процесі їх отримання, який складається з декількох стадій: напилення, оплавлення, можливість подальших обробок. Тому досліджували вплив зазначених операцій на структуру і властивості покриття.

У літературі відсутні конкретні дані про структуру досліджуваних сплавів системи Ni-Cr-Si-B у процесі взаємодії їх з чавунною основою. Зазначається лише [3, 4], що їхня висока твердість і зносостійкість обумовлені наявністю карбідів, боридів, карбоборидів.

### Результати експерименту та обговорення

З аналізу подвійних взаємодій виявлено [4], що хром, нікель і залізо в кількості, відповідній досліджуваним сплавам, повинні утворювати між собою тверді розчини. Відомо, що кремній до 5 % розчиняється в нікелі, до 1% – у хромі, а в разі більшого вмісту утворює силіциди хрому ( $Cr_2Si$ ) у складі евтектики, наприклад  $Ni_2B$ ,  $Cr_2B$ . Вуглець імовірно взаємодіє з хромом і бором через те, що нікель і кремній є не карбидоутворювальними елементами. Із хромом вуглець може утворювати низку карбідів:  $Cr_{23}C_6$ ,  $Cr_7C_3$ ,  $Cr_3C_2$  у складі евтектики та перитектики [4–6]. Характер перетворень у багатоконпонентній системі є функцією багатьох параметрів і не може бути конкретно передбачений за подвійними взаємодіями, але можна очікувати, що основною структурою розглянутих сплавів має бути багатоконпонентний твердий розчин на основі нікелю.

Структуру сплавів ПГСП4, ПГСПЗ (табл. 1) вивчали на вихідних порошках (рис. 1) у шарі, який не оплавився, у шарі після оплавлення та після об'ємного гартування деталей з оплавленням напиленого шару. Для цих же станів визначали твердість і проводили рентгеноструктурний аналіз.

Оплавлення шару здійснювали в умовах прискореного газоплазмового поверхневого нагріву з порівняно повільним охолодженням. За таких умов можна очікувати деякого наближення структури до рівноважної. У вихідному порошку й особливо в шарі після напилення структури утворюються в умовах, більш далеких від рівноваги.

Таблиця 1 – Склад напилених порошків

Марка порошку	Хімічний склад, %					
	Cr	Si	B	Fe	C	Ni
ПГСР4 тип ПН-ХН80С4Р4	16,0–18,0	3,0–4,5	2,8–3,8	до 5,0	0,6–1,0	основа
ПГСР3 тип ПН-ХН80С3Р3	13,5–16,5	2,5–3,5	2,0–2,8	до 5,0	0,4–0,7	–"
Домішки в кількості до 0,04 % сірки й фосфору						



а



б

Рис. 1. Структура порошків для напилювання покриттів ПГСР4, x1000

Рентгенографічно у вихідному порошку реєструється багатофазна структура. Найбільш повно представлені лінії твердого розчину на основі нікелю та карбідної фази типу  $Cr_{23}C_6$  (рис. 2, а). Але багато ліній не піддаються однозначній ідентифікації. Можна знайти збіг з основними лініями боридів хрому й нікелю, силіцидів хрому. Рентгенограма оплавленого шару (рис. 2, б) досить повно збігається з рентгенограмою порошку. На рентгенограмі порошку, який не оплавився (рис. 2, в), зберігаються лінії карбідів хрому і найбільш сильні лінії інших фаз. Збереження ліній фаз у напиленому шарі без оплавлення й шарі після гартування свідчить про те, що зафіксовані фази утворюються під час первинної кристалізації. Це підтверджує металографія вихідного порошку та вихідного шару. У структурі порошку видно кристали, а також дисперсна суміш фаз між ними (рис. 1 а, б). Схожа структура в оплавленому шарі (рис. 3): елементи однорідно розподілені в його обсязі. Електронно-мікроскопічні дослідження показують, що в зоні грубих сумішей спостерігаються орієнтовані ділян-

ки, у зоні дрібних сумішей – неорієнтовані, менш дисперсні. Можна припустити, що фаза, яка реєструється у вигляді округлих частинок, є карбідом хрому. Частинки зберігаються в процесі нагрівання шару під гартування (рис. 3, г). Заміри мікротвердості це підтверджують.

Багатофазність шарів зразків, які досліджувалися, виявлена рентгенівським аналізом, підтверджується мікроскопічними дослідженнями.

Аналогічний фазовий і структурний склад має і покриття з ПГСР3, відмінною рисою шару є менша кількість грубої суміші фаз, що пов'язано зі зміною змісту у сплаві вуглецю.

Оплавлення шарів призводить до часткового розплавлення металу основи й активізації процесів дифузії в нагрітій до високої температури приграничній зоні. Це викликає змішування матеріалу основи з матеріалом шару та утворення нового сплаву, відмінного за структурою від основи й поверхневого шару.

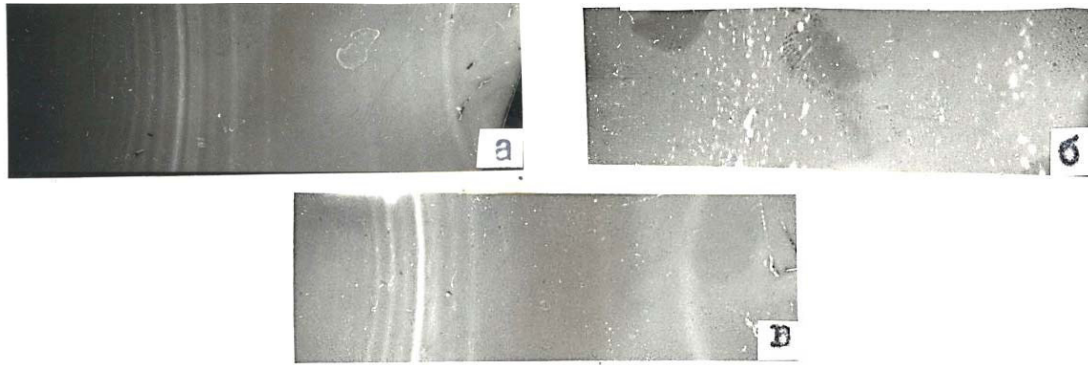


Рис. 2. Рентгенограми сплавів ПГСП4: а – порошок ПГСП4,  $\lambda\text{Cr}$ ; б – оплавлений шар; в – неоплавлений шар

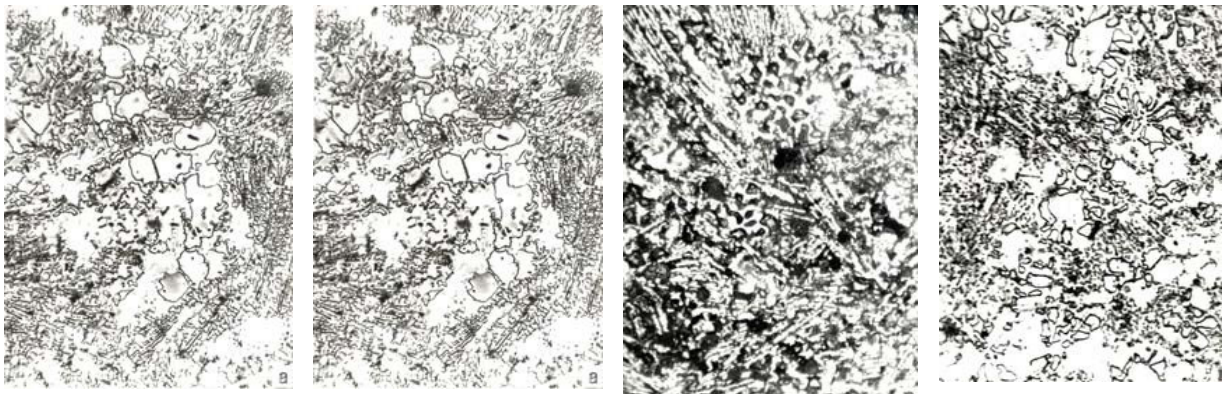


Рис. 3. Структура оплавленого шару ПГСП4: а, б – грубі й тонкі суміші; в – структура після травлення; г – структура після об'ємного гартування; а, в –  $\times 1000$ ; б, г –  $\times 440$

У напиленні сплавами ПГСП у структурі основного металу в приграничних зонах змін не відбувається, тому що незначний сумарний нагрів основного металу; взаємодія його з частинками покриття дуже слабка (рис. 4).

У разі оплавлення отриманих покриттів спостерігаються значні зміни структури ча-

вуну на границі з шаром і в шарі на границі з чавуном унаслідок інтенсифікації дифузійних процесів. На границі шару відбувається збільшення кількості грубої суміші фаз (рис. 5), що можна пояснити дифузією вуглецю та заліза з чавуну в шар ПГСП4 і ПГСП3.



Рис. 4. Структура границі підкладки (сірий чавун) і шару з наплавленим ПГСП4,  $\times 340$

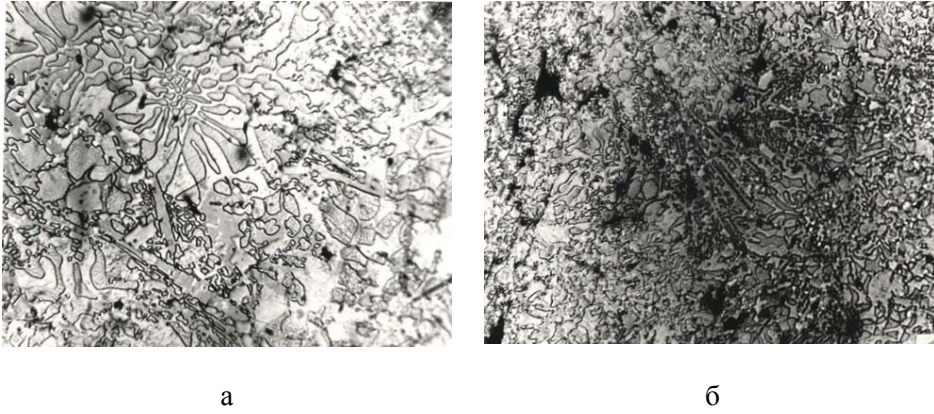


Рис. 5. Структура оплавленого шару ПГСР4: а – грубі суміші; б – тонкі суміші, x1000

На границі з нерозплавленим металом утворюється тонкий прошарок однофазного сплаву. У чавуні на границі утворюється

прошарок зі збільшеним вмістом фериту, що може бути наслідком дифузії в основу графітуючого компонента нікелю.

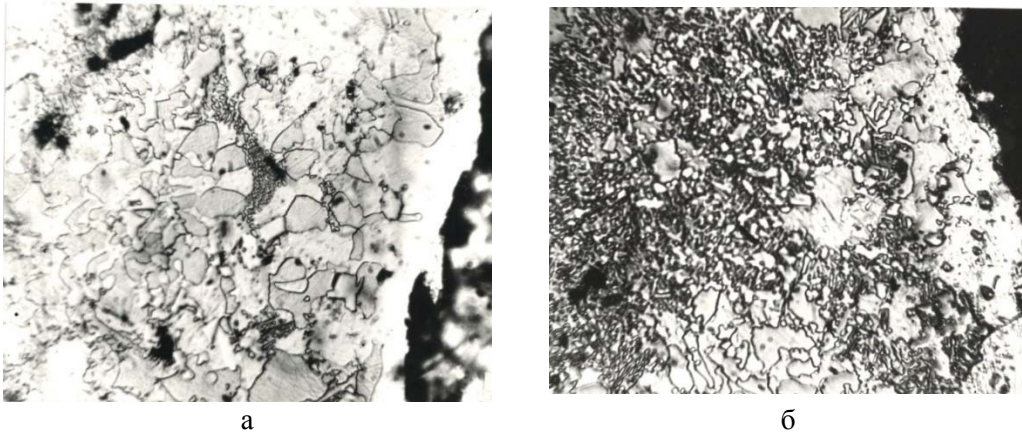


Рис. 6. Структура приграничної зони оплавленого шару

Зазначені структурні особливості покриттів зі сплавів ПГСР і зміни в структурі в процесі наступних обробок підтверджуються

зміною макро- та мікротвердості (рис. 7 і табл. 1).

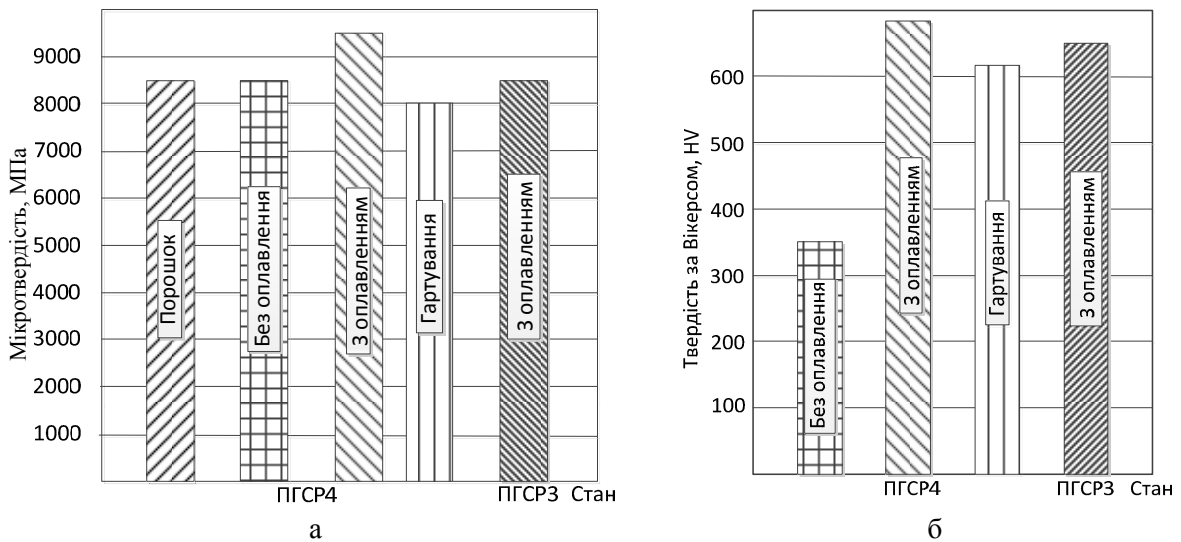


Рис. 7. Твердість покриття ПГСР: а – мікротвердість; б – твердість за Бринелем

Найбільшу макро- і мікротвердість мають оплавлені шари, які характеризуються найбільш повним набором зміцнювальних фаз. Найменша мікротвердість у шарі після об'ємного гартування внаслідок розчинення в процесі нагріву значної кількості зміцнювальних фаз і помітної коагуляції фаз, що залишилися. Висока середня мікротвердість неоплавленого шару, мабуть, пов'язана зі специфікою надшвидкісної кристалізації частинок під час напилювання, що приводить до утворення в них дрібних зерен. Зміцнювальна дія дрібного зерна компенсує зниження мікротвердості за умови зміни фазового складу, виявленого рентгенографічно.

Підтвердження цьому можна знайти в процесі зіставлення мікротвердості вихідного порошку й частинок шару. Мікротвердість вихідного порошку характеризується широким інтервалом значень 5700 ... 8900 МПа, що пов'язано як зі структурним станом частинок, так і з можливим розходженням складу. Меншу твердість (5700 ... 8250 МПа) мають частки з меншою кількістю виявлених зміцнювальних фаз (рис. 1, а), більшу (7600 ... 8600 МПа) – з більшою їхньою кількістю (рис. 1, б).

У наплавленому шарі частки, що не розплавились, практично зберігають свою твердість (5700 ... 8250 МПа) та характеризуються меншим розходженням значень мікротвердості та ще більш високим середнім рівнем, приблизно 7300 ... 8500 МПа. Знижена твердість наплавленого шару обумовлена його високою пористістю. Більш низька твердість оплавленого покриття ПГСПЗ (HV = 700 ... 760), порівняно з ПГСП4 (HV = 760 ... 820), пов'язана здебільшого зі зменшенням кількості зміцнювальних фаз.

Отже, аналіз зміни структури та властивостей покриттів із порошків ПГСП після напилення й оплавлення дозволяє зробити висновок, що найкращі властивості повинні мати оплавлені покриття.

Подальша термічна обробка, пов'язана з високотемпературним тривалим нагріванням, небажана, тому що погіршує структуру та властивості покриття. Покриття доцільно наносити на деталь після її остаточної обробки.

Можливість застосування покриття ПГСП4 для підвищення зносостійкості чавуну була перевірена в промислових умовах. Після шліфування глибина шару становила

1200 мкм, шорсткість поверхні Ra не більше ніж 2,5 мікрона.

У досліджуваних умовах експлуатації поршневі кільця виходять з ладу через один місяць роботи внаслідок інтенсивного й дуже нерівномірного зносу зовнішньої поверхні. Напилені кільця були зняті для контролю через три місяці експлуатації. Поверхня втулки після експлуатації набула вигляду полірованого виробу (Ra не більше ніж 0,32 мікрона) без будь-яких локальних порушень поверхні.

### Висновки

1. Аналіз зміни структури і властивостей покриттів з порошків ПГ-СП показав, що найкращі характеристики повинні мати оплавлені покриття.

2. Для покриттів із порошків ПГСП термічна обробка небажана, тому що погіршує структуру та властивості покриття.

3. Можливість застосування покриттів з порошків ПГСП для підвищення зносу була перевірена в умовах експлуатації захисних втулок водяних насосів. Робота впроваджена в практику ПАТ «Харківський машинобудівний завод «Світло Шахтаря»».

### Література

1. Navas C., Colaço R., De Damborenea J., Vilar R. Abrasive wear behaviour of laser clad and flame sprayed-melted NiCrBSi coatings. *Surface & Coatings Technology*. 2006, vol. 200, no. 24.
2. ГОСТ 21448–75. Порошки из сплавов для наплавки. Технические условия (с изменениями № 1, 2, 3) Постановление Госстандарта СССР от 31.12.1975 № 4113 ГОСТ от 31.12.1975 № 21448-75
3. <http://www.plasmacentre.ru/produkcziya/poroshki-provoloka-elektrodyi/pgsr4/>
4. Кудинов В. В., Иванов В. М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. Москва: Машиностроение, 1981. 217 с.
5. Никитин Н. Д., Кулик А. Я., Захаров Н. И. Теплозащитные и износостойкие покрытия. Ленинград: Машиностроение, 1977. 198 с.
6. Эллиот Р. П. Структуры двойных сплавов. Москва: Металлургия, 1970. Т. 2. 234 с.
7. Перспективы упрочнения покрытий методом плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой / А. М. Кадырметов, В. О. Никонов, В. Н. Бухтояров и др. *Станочный парк*. 2012. № 8 (86). С. 23–25.

### Reference

1. Navas C., Colaço R., De Damborenea J., Vilar R. Abrasive wear behaviour of laser clad and flame sprayed-melted NiCrBSi coatings. *Surface &*

- Coatings Technology*. 2006, vol. 200, no. 24.
- GOST 21448-75 Poroshki iz splavov dlya naplavki. Tehnicheskie usloviya (s Izmeneniyami no. 1, 2, 3) Postanovlenie Gosstandarta SSSR ot 31.12.1975 no. 4113GOST ot 31.12.1975 no. 21448-75
  - <http://www.plasmacentre.ru/produkcziya/poroshki-provoloka-elektrodi/pgsr4/>
  - Kudinov V. V., Ivanov V. M. Nanesenie plazmoy tugoplavkih pokry'tiy. Moscow: Mashinostroenie, 1981, 217 p.
  - Nikitin N. D., Kulik A. Ya., Zaharov N. I. Teplozasch'itny'e i iznosostoykie pokry'tiya. Leningrad: Mashinostroenie, 1977, 198 p.
  - E'lliot R. P. Struktury' dvoynyh splavov. Moscow: Metallurgiya, 1970, vol. 2, 234 p.
  - Perspektivy' uprochneniya pokry'tiy metodom plaz-mennogo napy'leniya s odnovremennoy e'lektromehanicheskoy obrabotkoy / A. M. Kady'rmetov, V. O. Nikonov, V. N. Buhtoyarov et al. *Stanochny'y park*. 2012, no. 8 (86), pp. 23-25.

**Глушкова Діана Борисівна**, д.т.н., проф., завідувач кафедри технології металів та матеріалознавства, 057-707-37-29, [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua), Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25

#### **Структура и свойства газопламенных многокомпонентных покрытий**

**Аннотация.** В работе рассмотрены вопросы формирования газопламенных покрытий на деталях цилиндра-поршневого группы с использованием самофлюсующихся порошков на основе никеля. Структура покрытия многофазна. Результаты проведенных исследований и промышленных испытаний позволяют рекомендовать покрытие для практического использования.

**Ключевые слова:** покрытия, оплавления, напыление, карбидная фаза, микротвердость.

**Глушкова Диана Борисовна**, д.т.н., заведующий кафедры технологии металлов и материаловедения, тел. 097-481-15-93, [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua) Харьковський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, г. Харків, ул. Ярослава Мудрого, 25.

#### **Structure and properties of plasma-flame multi-component coatings**

**Abstract.** The paper deals with the formation of plasma-flame coatings on the parts of the cylinder-piston group using self-fluxing powders based on nickel. The formation of the operational properties of such coatings occurs at all stages of the process of their preparation; therefore, we investigated the change in their structure and properties after the coating was sprayed, melted, and then quenched. The coating structure is multiphase. Metallographic and X-ray studies revealed the presence of a solid solution based on nickel in the sprayed layer, a carbide phase, chromium and nickel borides, and chromium silicide. Heating during spraying does not lead to a change in the base; structural changes in the base metal occur only when the coating is melted. The fused layers containing the greatest amount of strengthening phases possess the highest macro- and microhardness. The Research carried out and industrial tests allow us to recommend the coating for practical use.

**Key words:** coating, melting, spraying, carbide phase, microhardness.

**Hlushkova Diana**, Doct. Sc., Chef of Department of Technology of Metals and Materials Science, tel: 057-707-37-29, [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua) Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.