

## ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОТРИВКОСТІ НИЗЬКОЛЕГОВАНОЇ КОНСТРУКЦІЙНОЇ СТАЛІ ПЛАЗМОВО-ПОРОШКОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ СПЛАВАМИ НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА, ХРОМУ І НІКЕЛЮ

Є. Ф. ПЕРЕПЛЬОТЧИКОВ<sup>1</sup>, Х. Б. ВАСИЛІВ<sup>2</sup>,  
В. А. ВИНАР<sup>2</sup>, І. О. РЯБЦЕВ<sup>1</sup>, В. І. ЗАКІСВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ;

<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>3</sup> Національний авіаційний університет, Київ

Досліджено хімічну і структурну неоднорідність, параметри зносотривкості покриттів, отриманих методом плазово-порошкового наплавлення. Покриття отримано з порошків ПР-ХН80СР3, ПН-АН-34 та Х17Н8С6Г на основі нікелю, кобальту й заліза та експериментального порошку на основі Ni та Fe. Трибологічні властивості сплавів на основі заліза кращі від кобальтових та нікелевих. Під час тертя відбувається пластична деформація аустенітного компонента покриття та його розмашування на поверхні, що призводить до зменшення коефіцієнта тертя та зносу.

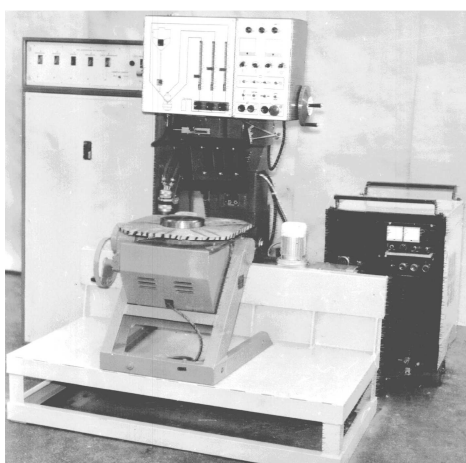
**Ключові слова:** *плазово-порошкове наплавлення, порошки, залізо, нікель, кобальт, зносотривкість.*

Безвідмовна робота сучасних трубопроводів для нафти та газу, а також нафто- й газодобувних свердловин багато в чому залежить від надійності трубопровідної арматури. Своєю чергою, її надійність визначають головно роботоздатністю наплавленого металу ущільнювальних поверхонь деталей затвора. Для наплавлення таких поверхонь нафтогазодобувної арматури використовують сплави на основі кобальту, нікелю, заліза, леговані бором і кремнієм [1–12]. Останнім часом дослідження спрямовані на часткову заміну нікелю і кобальту на залізо, що дасть змогу знизити витрати на присадні матеріали, поліпшити якість наплавленого металу, полегшити умови та підвищити продуктивність наплавлення [13]. В Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона (ІЕЗ) розроблено дослідний сплав, який містить приблизно однакову кількість нікелю й заліза (по 35%) і дешевший від сплавів на основі нікелю. Нижче досліджено хімічну і структурну неоднорідність, параметри зносотривкості металів, наплавлених плазово-порошковим методом з використанням дослідного сплаву та порошків ПР-ХН80СР3, ПН-АН-34 і Х17Н8С6Г на основі нікелю, кобальту і заліза.

**Методики досліджень.** Основними перевагами плазового наплавлення є висока стабільність горіння плазової дуги, широкі можливості комбінації наплавленого і основного металів, роздільного регулювання їх нагріву для економічно ефективного поліпшення властивостей матеріалів.

Для плазово-порошкового наплавлення використовували універсальну установку ОБ2184 на базі апарату А1756, розроблену в ІЕЗ (рис. 1). Хімічний склад порошків наведено у табл. 1.

Плазово-порошкове наплавлення здійснювали на зразках зі сталі 20 розміром 160×40×20 mm. Режим наплавлення: струм 250...300 А, подача порошку



3 kg/h, швидкість наплавлення 6 м/х, розмах коливань плазмотрона 24 mm, їх частота 45 min<sup>-1</sup>. Витрати транспортувального, плазмоутворювального та захисного газів (аргон в усіх випадках) відповідно 3 l/h; 2 і 12 l/min. Наплавлені за цих умов валики мали ширину 25...35 mm і висоту 6,0...6,6 mm за двошарового наплавлення.

Рис. 1. Універсальна установка для плазово-порошкового наплавлення.

Fig. 1. Universal equipment for arc-powder deposition.

Таблиця 1. Хімічний склад порошків для плазово-порошкового наплавлення, mass%

Марка	C	Cr	Si	Mn	Ni	Fe	B	Co	Інші
ПР-ХН80СР3	0,6... 0,9	15... 17	2,7... 3,7	–	Основа	≤ 5,0	2,3... 3,0	–	–
ПН-АН-34	0,7... 1,0	28... 32	1,5... 2,5	–	4...8	≤ 3,0	0,5... 0,9	Основа	4...5 W
ЦН-6 (Х17Н8С6Г)	0,05... 0,12	15... 18	4,8... 6,4	1...2	7...9	Основа	–	–	–
Дослідний склад	0,8	18	3,5	≤ 1,0	35	35	2,5	–	–

Трибологічні дослідження виконували на установці тертя зі зворотно-поступальним рухом індентора за схемою кулька–площина. Зразки для досліджень полірували до шорсткості  $R_z = 2,5 \mu\text{m}$ . Контртіло – керамічна кулька ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) діаметром 9 mm. Прикладене нормальне навантаження 10 N, довжина доріжки тертя 16 mm, швидкість переміщення індентора 0,003 m/s. Зміну досліджуваних параметрів за трибокорових випробувань реєстрували за допомогою персонального комп'ютера з кроком вимірювань 0,25 s.

Мікроструктуру поверхонь вивчали металографічним методом на сканівному електронному мікроскопі EVO 40XVP із системою мікрорентгеноспектрального аналізу з використанням енергодисперсійного спектрометра INCA ENERGY 350.

У зв'язку з високою дисперсністю сплавів, отриманих методом плазово-порошкового наплавлення, для визначення пружно-пластичних властивостей окремих фаз застосовували метод динамічного індентування. Для цього використовували прилад "Микрон-гамма", який ґрунтується на автоматичній реєстрації діаграми навантаження  $P = f(h)$ , де  $P$  – навантаження на індентор (алмазна піраміда Берковича),  $h$  – його заглиблення у досліджуваний матеріал [14, 15]

**Результати та їх обговорення.** Мікроструктуру наплавленого металу на основі нікелевого порошку ПР-ХН80СР3 (табл. 1) наведено на рис. 2. Наплавлені шари, які містять 8...20% Cr та 1,5...4,5% B, мають, в основному, трифазну структуру. Матриця сплаву I (світлого кольору) складається переважно з нікелю, легovanого залізом (~ 25%) і хромом (~ 5%). Твердість (за Меєром) цієї фази становить 6...7 GPa. Фаза сірого кольору II, ймовірно, містить твердий розчин Fe і Ni у хромі та карбіди  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  (табл. 2). Її мікротвердість змінюється від 7 до 8,5 GPa. У фазі темно-сірого кольору III з мікротвердістю ~ 15 GPa виявлено високий

вміст бору. Рентгенофазовим аналізом підтверджено присутність у сплаві сполук типу FeCrB. У мікроструктурі наплавленого шару також виявлено численні дрібні (1...2 μm) чорні включення з концентрацією вуглецю понад 50%.

За допомогою методу динамічного наноіндентування визначено, що ширина подряпини на поверхні збагаченої нікелем матриці I утрічі більша, ніж на включеннях з високим вмістом хрому II. Зафіксували пластичне деформування нікелевмісної фази і крихке руйнування збагаченої хромом.

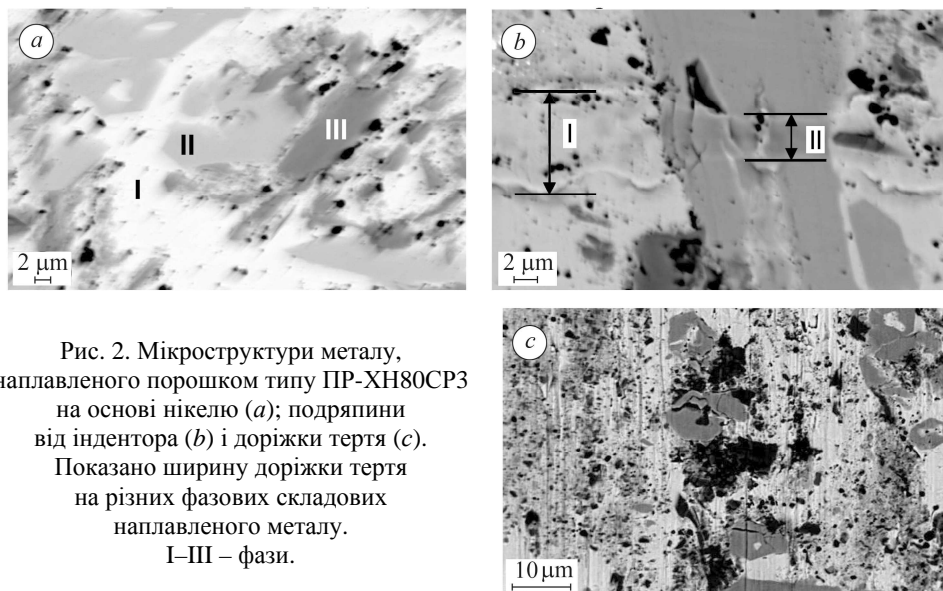


Рис. 2. Мікроструктури металу, наплавленого порошком типу ПР-ХН80СР3 на основі нікелю (а); подряпини від індентора (b) і доріжки тертя (с). Показано ширину доріжки тертя на різних фазових складових наплавленого металу. I–III – фази.

Fig. 2. Microstructurei of metal, deposited from powder ПР-ХН80СР3 on the nickel base (a); scratches from indenter (b) and friction track (c). The width of the friction track on the various phase components of the overlay metal is shown. I–III – phase.

**Таблиця 2. Хімічний склад структурних елементів металу, наплавленого порошком типу ПР-ХН80СР3**

Елемент	Вміст елементів у фазах згідно з рис. 2, mass%		
	I	II	III
Si K	0,42	–	–
B K	–	0,00	20,14
C K	2,53	7,52	–
Cr K	4,78	67,33	77,00
Fe K	25,85	18,06	2,86
Ni K	66,42	7,09	–

Під час випробувань сплаву на зносотривкість виявили, що через суттєві відмінності механічних властивостей його фазових складових коефіцієнти тертя змінюються стрибкоподібно від 0,2 до 0,4. Доріжка тертя досить широка і досягає 270 μm (рис. 3). На поверхні тертя виявили сліди пластичної деформації нікелевої фази та численні дрібнодисперсні продукти зношування, утворені в результаті викришування твердих фаз. На поверхні окремих включень, збагачених хромом, спостерігали тріщини (рис. 2c). На фрикційній поверхні виявили алюміній і кисень, які входять до складу контртіла. Це свідчить про стирання корунду за контакту з твердим сплавом, який містить карбідні і боридні фази.

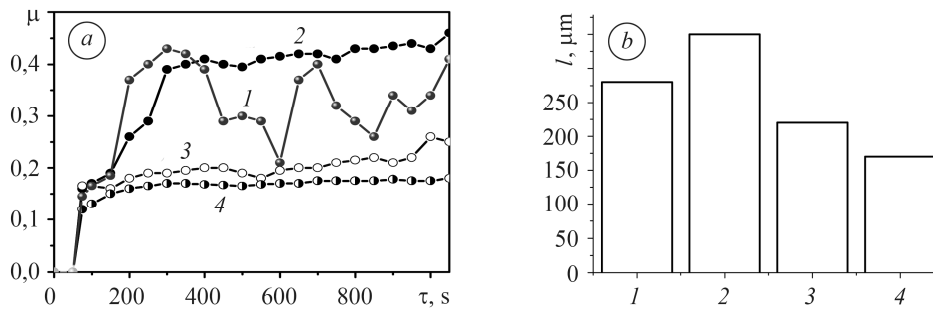


Рис. 3. Зміна коефіцієнтів тертя (а) і ширина доріжки (b) під час тертя сплавів, наплавлених порошками ПР-ХН80СР3 (1), ПН-АН-34 (2), Х17Н8С6Г (3) та дослідного Ni-Fe сплаву (4).

Fig. 3. Friction coefficient (a) and track width (b) under friction of alloys, deposited from ПР-ХН80СР3 (1), ПН-АН-34 (2), Х17Н8С6Г (3) powders and experimental Ni-Fe alloy (4).

У структурі металу, напавленого порошком ПН-АН-34 на основі кобальту (див. табл. 1), виявлено три фази (рис. 4). Світло-сіра аустенітна основа I складається з кобальту, легованого хромом (~ 23 %), нікелем, вольфрамом та ін. Мікротвердість цієї фази становить ~ 6...6,5 ГПа. До складу темно-сірих включень II входить 65% хрому, ~ 8% вуглецю і ~ 6% вольфраму. Їх мікротвердість становить 7...8 ГПа. Основними компонентами білих локальних включень III є вольфрам, кобальт і хром (табл. 3). У мікроструктурі також містяться дрібні чорні включення, які містять 13% вуглецю.

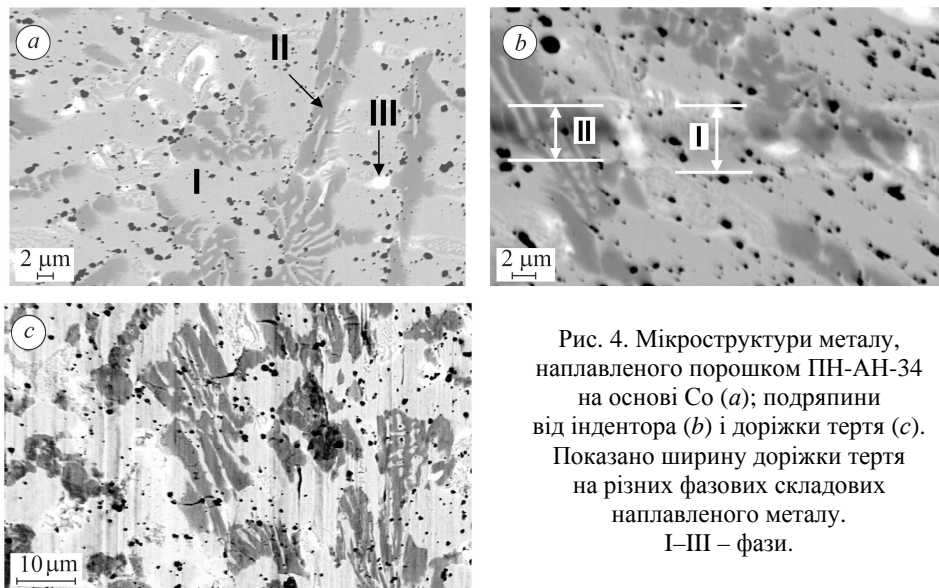


Рис. 4. Мікроструктури металу, напавленого порошком ПН-АН-34 на основі Co (a); подряпини від індентора (b) і доріжки тертя (c). Показано ширину доріжки тертя на різних фазових складових напавленого металу. I-III – фази.

Fig. 4. Microstructures of metal, deposited from ПН-АН-34 powder on the basis of Co (a); scratches from indenter (b) and friction track (c). The width of the friction track on the various phase components of the overlay metal is shown. I-III – phases.

Таким чином, структурні елементи напавленого металу складаються з твердого розчину на базі кобальту і карбідів, переважно типу  $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$  і  $M_6C$  [11], до складу яких поряд з хромом і вольфрамом входить також кобальт.

За допомогою скретч-методу виявили, що ширина подряпини на евтектичних і вольфрамових включеннях дещо менша, ніж на аустенітній основі, але відмінність не така велика, як у попередньому випадку. Це свідчить про те, що механічні властивості структурних елементів сплаву відрізняються несуттєво.

**Таблиця 3. Хімічний склад структурних елементів металу, наплавленого порошком ПН-АН-34**

Елемент	Вміст елементів у фазах згідно з рис. 4, mass%		
	I	II	III
C K	4,48	8,63	2,96
Si K	1,94	–	–
Cr K	23,13	65,78	26,47
Fe K	2,52	1,08	1,26
Co K	57,46	18,06	35,97
Ni K	6,68	–	3,02
W M	3,80	6,45	30,32

Під час тертя металу, наплавленого порошком на основі кобальту, виявили високі значення коефіцієнта тертя (0,4) і ширини доріжки тертя (350  $\mu\text{m}$ ) (рис. 3). На поверхні тертя спостерігали викришування фази з високим вмістом вольфраму, тріщини на поверхні евтектичної складової і проорювання поверхні аустеніту твердими продуктами зношування (рис. 4с).

Мікроструктура наплавленого металу типу аустенітної сталі X17H8C6Г (див. табл. 1) складається з двох фаз (рис. 5).

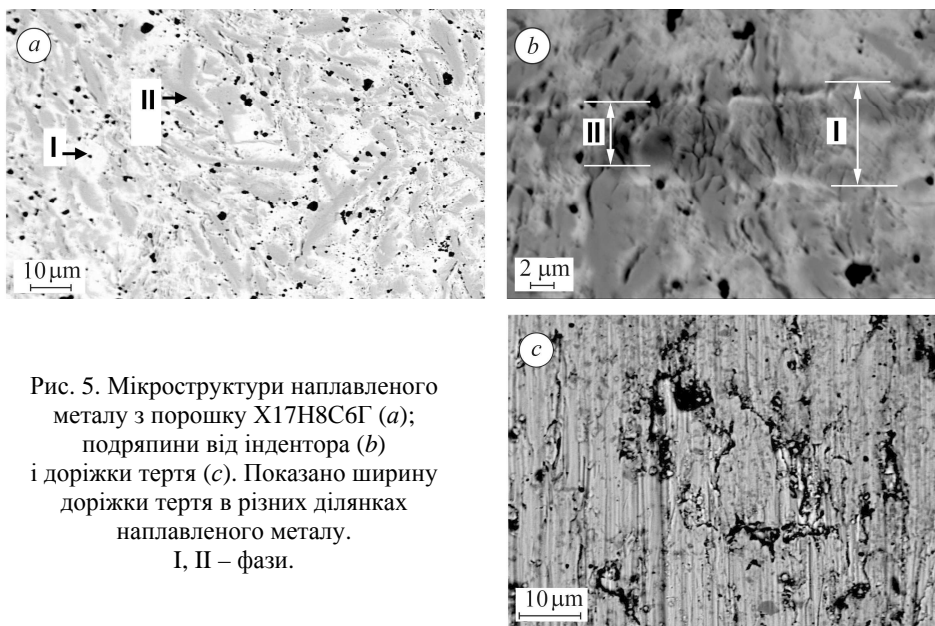


Рис. 5. Мікроструктури наплавленого металу з порошку X17H8C6Г (а); подряпини від індентора (b) і доріжки тертя (c). Показано ширину доріжки тертя в різних ділянках наплавленого металу. I, II – фази.

Fig. 5. Microstructures of metal, deposited from X17H8C6Г (a) powder; scratches from indenter (b) and friction track (c). The width of the friction track on the various phase components of the overlay metal is shown. I, II – phases.

Мікроструктура наплавленого шару двофазна. Світліша зона, крім залізної основи, містить  $\sim 34\%$  Ni,  $\sim 13\%$  Cr. У темнішій фазі, крім цих елементів, виявили високий вміст вуглецю ( $\sim 14\%$ ). Мікротвердість світлішої фази 6...6,5 GPa, темнішої – 7,5...8 GPa. Крім цього, спостерігали численні чорні включення, збагачені вуглецем.

За допомогою скретч-методу виявили, що ширина подряпини на поверхні, де переважає темніша фаза, на 10...15% менша, ніж на ділянках, збагачених світ-

лою фазою. Фаза II дуже крихка і в зоні подряпини містить численні тріщини. Твердість, крихкість та високий вміст вуглецю у цій фазі вказують на присутність карбідів. Світліша фаза пластичніша, там виявили ділянки нашарування матеріалу під час переміщення індентора.

Таблиця 4. Хімічний склад структурних елементів металу типу сталі X17H8C6Г

Елемент	Вміст елементів у фазах згідно з рис. 5, mass%	
	I	II
C K	3,58	13,70
Si K	3,73	2,85
Cr K	12,51	20,29
Fe K	45,17	38,50
Mn K	0,88	1,04
Ni K	34,12	23,62

Сплави, отримані з порошків на основі заліза, мають вищі трибологічні властивості, ніж кобальтові та нікелеві. У сплаві на основі X17H8C6Г коефіцієнт тертя і ширина доріжки зносу удвічі нижчі, ніж на основі кобальту, і становлять відповідно 1,5...2 і ~ 220  $\mu\text{m}$ . На поверхні тертя виявили пластично деформований шар аустенітної складової, збагачений нікелем (~ 44%) та локальні темні плями (рис. 5с). Імовірно, під час тертя відбувається пластична деформація аустенітної складової і її розмашування по фрикційній поверхні, що призводить до зниження коефіцієнта тертя і зносу.

Мікроструктура наплавленого металу дослідного складу (див. табл. 1) складається з двох основних фаз і карбідних включень (рис. 6).

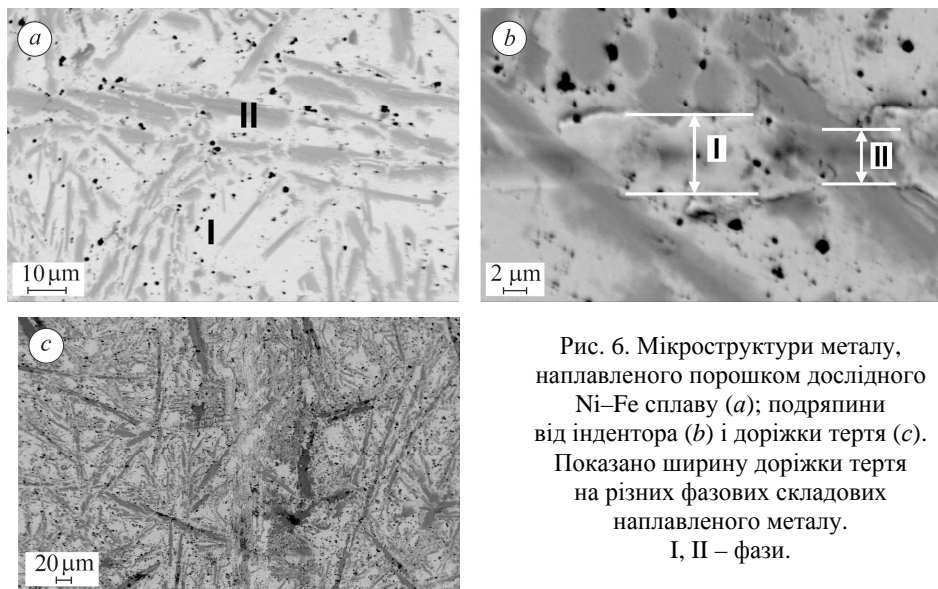


Рис. 6. Мікроструктури металу, наплавленого порошком дослідного Ni-Fe сплаву (a); подряпини від індентора (b) і доріжки тертя (c). Показано ширину доріжки тертя на різних фазових складових наплавленого металу. I, II – фази.

Fig. 6. Microstructure of metal, deposited from of Ni-Fe alloy powder (a); scratches from indenter (b) and friction track (c). The width of the friction track on the various phase components of the overlay metal is shown. I, II – phases.

У фазі світлого кольору міститься до ~ 70% нікелю, ~ 18% заліза, ~ 6% кремнію, до складу темнішої складової входить ~ 64% хрому, ~ 29% заліза і ~ 7% ні-

келю (табл. 5). Основними компонентами чорних включень є вуглець (~ 48%), залізо (~ 14%) і нікель (~ 31,8%). Мікротвердість збагаченої нікелем складової становить ~ 7...7,75 GPa, а евтектичної фази досягає ~ 12,2 GPa.

**Таблиця 5. Хімічний склад структурних елементів металу, наплавленого порошком дослідного сплаву на основі Ni та Fe**

Елемент	Вміст елементів у фазах згідно з рис. 6, mass%	
	I	II
C K	2,66	–
Si K	6,22	–
Cr K	2,63	64,56
Fe K	18,06	28,54
Mn K	1,07	–
Ni K	69,35	6,90

Аналіз мікроструктури подряпини від індентора показав, що фаза, збагачена нікелем, пластичніша, ніж хромовмісна. Ширина подряпини на ній удвічі більша, ніж на поверхні темнішої складової через пластичне витіснення матеріалу. В зоні подряпини змін структури евтектичної фази не виявили.

У металі, який наплавляли порошком дослідного сплаву на основі Ni та Fe, виявили найвищу зносотривкість. Випробування показали, що коефіцієнти тертя сплаву на основі Ni та Fe стабільні і низькі упродовж всього часу випробувань (0,15). Доріжка тертя на ~ 40% вужча, ніж у сплаві на основі заліза (див. рис. 3). Мікроструктура поверхні тертя практично не змінена, на ній видно лише окремі вирви розміром кілька мікрометрів. Значна частина поверхні покрита розмещеним матеріалом пластичної фази (рис. 6с).

### **ВИСНОВКИ**

У металі, наплавленому порошком типу ПР-ХН80СРЗ на основі нікелю, виявили тверді фази, які містять карбіди хрому і бориди типу FeCrB. Через суттєву відмінність механічних властивостей фазових складових коефіцієнти тертя змінюються стрибкоподібно, спостерігали викришування твердих фаз і стирання корундового контртіла. Структурні елементи металу, наплавленого порошком ПН-АН-34, складаються з твердого розчину на базі кобальту і карбідів хрому, кобальту та вольфраму. Високі коефіцієнти тертя зумовлені викришуванням фази з високим вмістом вольфраму, тріщинами на поверхні евтектичної складової і проорюванням поверхні аустеніту твердими продуктами зношування. Сплави, отримані з порошків на основі заліза, мають кращі трибологічні властивості, ніж кобальтові та нікелеві. Під час тертя відбувається пластична деформація аустенітної складової і її розмашування по фрикційній поверхні, що призводить до зниження коефіцієнта тертя і зносу. Коефіцієнти тертя сплаву на основі Ni та Fe стабільні і низькі упродовж всього часу випробувань (0,15).

*РЕЗЮМЕ.* Исследована химическая и структурная неоднородность, параметры износостойкости покрытий, полученных методом плазменно-порошковой наплавки. Для наплавки использовали порошки ПР-ХН80СРЗ, ПН-АН-34 и Х17Н8С6Г на основе соответственно никеля, кобальта и железа и экспериментальный порошок на основе Ni и Fe. Трибологические свойства сплавов на основе железа лучше, чем кобальтовых и никелевых. При трении аустенитный компонент наплавленного слоя пластически деформируется и наносится тонким слоем на поверхность трения, что приводит к уменьшению коэффициента трения и износа.

**SUMMARY.** The chemical and structural heterogeneity, the parameters of wear resistance of coatings, obtained by arc-welding method, are investigated. Coatings were obtained from ПР-ХН80СР3, ПН-АН-34 and Х17Н8С6Г powders on the basis of nickel, cobalt and iron, respectively and experimental powder on the basis of Ni and Fe. Tribological properties of the iron-based alloys are better than of the cobalt- and nickel-based ones. Reduction of friction coefficient and wear are the result of plastic deformation of the austenitic component in coating and its lubrication on the surface.

**Робота виконана в ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України та ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України в межах програми “Ресурс-2”.**

1. Хасуй А. Техника напыления. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
2. Dilthey Ul. and Kabatnik L. Zentral Pulverzufuhr beim Plasmaauftragschweißen // Schweißen und Schneiden. – 1998. – №12. – P. 766–771.
3. Гладкий П. В., Переpletчиков Е. Ф., Рабинович В. И. Плазменная наплавка в энергетическом арматуростроении. – М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1970. – 36 с.
4. А.с. № 339591 СССР. С22с 19/00. Жаростойкий и износостойкий сплав на никелевой основе / И. И. Фрумин, П. В. Гладкий, Е. Ф. Переpletчиков. – Оpubл. 1972, Бюл. № 17.
5. An effective approach for creating metallurgical self-bonding in plasma-spraying of NiCr–Mo coating by designing shell-core-structured powders / J.-J. Tian, S.-W. Yao, X.-T. Luo, C.-X. Li, Ch.-J. Li // Acta Materialia. – 2016. – **110**. – P. 19–30.
6. Microstructure, mechanical and tribological properties of plasma-sprayed NiCrAlY–Mo–Ag coatings from conventional and nanostructured powders / B. Li, J. Jia, M. Han, Y. Gao, C. Li // Surface and Coatings Technology. – 2017. – **324**. – P. 552–559.
7. Hejrowski T. Sliding wear resistance of Fe-, Ni- and Co-based alloys for plasma deposition // Vacuum. – 2006. – **80**, Is. 11–12. – P. 1326–1330.
8. The study of the technology of laser and plasma surfacing of engine valves face made of X40CrSiMo10-2 steel using cobalt-based powders / A. Klimpel, L. A. Dobrzański, A. Lisiecki, D. Janicki // J. of Mater. Proc. Techn. – 2006. – **175**, Is. 1–3. – P. 251–256.
9. Wear and impact behaviour of High Velocity Air-Fuel sprayed Fe–Cr–Ni–B–C alloy coatings / G. Bolelli, A. Milanti, L. Lusvarghi, L. Trombi, P. Vuoristo // Tribology Int. – 2016. – **95**. – P. 372–390.
10. Novel Fe-based wear and corrosion resistant coatings by three-cathode plasma technology / K. Bobzin, L. Zhao, M. Öte, T. Königstein // Surface and Coatings Technology. – 2017. – **318**. – P. 288–292.
11. Гладкий П. В., Переpletчиков Е. Ф., Рябцев И. А. Плазменно-порошковая наплавка. – К.: Экотехнология, 2007. – 292 с.
12. Оптимізація вмісту хрому в порошкових дротах систем Fe–Cr–C, Fe–Cr–B за корозійною тривкістю електродугових покривів / Т. Р. Ступницький, М. М. Студент, Г. В. Похмурська, В. М. Гвоздецький // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – **52**, № 2. – С. 23–28.  
(Optimization of the chromium content of powder wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B systems according to the corrosion resistance of electric-arc coatings / T. R. Stupnyts'kyi, M. M. Student, H. V. Pokhmurs'ka, V. M. Hvozdet's'kyi // Materials Science. – 2016. – **52**, № 2. – P. 165–172.)
13. Мікроструктура та опір абразивному зношуванню віброннаплавленого металу з порошкового дроту базової системи Fe–Cr–B / А. А. Войтович, Г. В. Похмурська, М. М. Студент, О. З. Студент // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – **52**, № 3. – С. 63–68.  
(Microstructure and abrasive-wear resistance of the vibration-deposited metal of core wires of the basic Fe–Cr–B system / A. A. Voitovych, H. V. Pokhmurs'ka, M. M. Student, O. Z. Student // Materials Science. – 2016. – **52**, № 3. – P. 365–370.)
14. Головин Ю. И. Наноиндентирование и его возможности. – М.: Металлургия, 1991. – 158 с.
15. Игнатович С. Р., Закиев И. М. Универсальный микро/нано-индентор “Микрон-гамма” // Заводская лаборатория. – 2011. – **77**, № 1. – С. 61–67.

Одержано 14.12.2017