



**ГВОЗДЕЦЬКИЙ**

**Володимир Миколайович** — кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу поверхневого зміцнення конструкційних матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України

## ЕЛЕКТРОДУГОВІ ВІДНОВНІ І ЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ З ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ

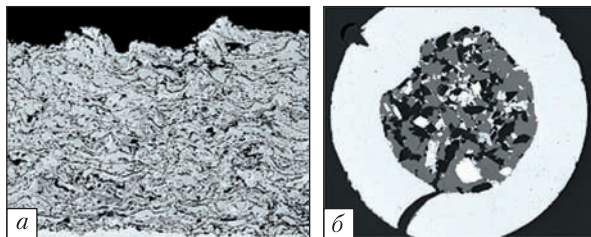
За матеріалами наукового повідомлення на засіданні Президії НАН України 13 грудня 2017 року

*Використання порошкових дротів для газотермічних методів нанесення покриттів дає змогу значно розширити сферу застосування цієї технології захисту металоконструкцій. Електродугові покриття, помірно легговані хромом, алюмінієм та кремнієм, мають високу жаростійкість. Формування оксидних плівок  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і  $\text{SiO}_2$  на їх поверхні істотно зменшує швидкість окиснення. За підвищеної температури спостерігається синергійний ефект дії ерозійного зносу та окиснення поверхонь деталей, при цьому оксиди руйнуються швидкими частинками палива. Нанесені покриття забезпечують жаростійкість та жароміцність матеріалів. Виділення дисперсних фаз нанометрових розмірів зумовлює мікротвердість покриттів на рівні 450–500 HV. Електродугове покриття з порошкового дроту Х6РЗЮ14 в експлуатаційних умовах має найвищий опір до газоабразивного зносу.*

**Ключові слова:** напилення, електродугові покриття, порошкові дроти, ламелі, окиснення, оксидні плівки.

На сьогодні в Україні працює близько 100 котлів теплових електростанцій (ТЕС). Внаслідок переведення цих станцій з природного газу і мазуту на вугілля, крім газової корозії, виникають проблеми, пов'язані з більш інтенсивним зношенням нагрівних елементів — труб економайзера — під дією твердих абразивних частинок. Процеси газоабразивного зношення призводять до істотного зменшення ресурсу роботи теплових котлів [1–3].

У світовій практиці в останні роки для подовження експлуатаційного ресурсу нагрівних елементів почали застосовувати методи газотермічного напилення покриттів [4, 5]. Як відомо, є чотири класичні методи напилення: електродугова металізація, газополуменеве, плазмове та детонаційне напилення. Серед цих методів електродугове напилення має у 2–3 рази вищу



**Рис. 1.** Типова структура: *a* – електродугового покриття ( $\times 500$ ); *b* – порошкового дроту ( $\times 250$ )

#### Склад порошкових дротів

Марка порошкового дроту	Вміст, %			
	B	Cr	Al	Fe
X6P3Ю2	3	6	2	решта
X6P3Ю6	3	6	6	решта
X6P3Ю14	3	6	14	решта

продуктивність і від 3 до 8 разів меншу вартість порівняно з іншими методами.

Для формування покриттів із порошкових дротів (ПД) використовували металізатор ЕМ-17 із закритою системою розпилення. Ця система, розроблена у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України, дозволяє збільшити довжину дуги та час перебування електродних матеріалів в умовах їх плавлення. Під час використання порошкових дротів для наплення було отримано електродугові покриття (ЕДП) (рис. 1*a*) різного функціонального призначення [6–9].

Порошкові дроти розробляють у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України (В.І. Похмурський, М.М. Студент) та в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (Ю.С. Борисов, І.О. Рабцев). Порошкові дроти складаються із зовнішньої сталеві оболонки та шихти (рис. 1*b*). Відновні і захисні покриття для елементів котлів за температур експлуатації мають зміцнюватися, що спричинено виділенням дисперсних фаз. Ці процеси можуть відбуватися в електродугових покриттях з порошкових дротів, де шихтовими матеріалами є ферохромбор з додаванням

алюмінію, нікелю чи вольфраму [10–12], що зумовлено виділенням у структурі цих покриттів дисперсних зміцнювальних фаз боридів та алюмінідів –  $\text{FeCrB}$ ,  $\text{Fe}_2\text{B}$ ,  $\text{Al}_3\text{Fe}$ .

Для досліджень було розроблено порошкові дроти з шихтою Fe-Cr-B-Al із вмістом алюмінію 2, 6 і 14 мас. % (див. табл.).

Властивості нанесених покриттів порівнювали із зарубіжними аналогами, які на практиці використовують для захисту нагрівних елементів котлів ТЕС.

Визначення залишкових напружень проводили за методом Бабичева, в якому враховується модуль пружності електродугового покриття, визначений за методом Тушинського. Жаростійкість визначали за зміною маси зразків. Для досліджень було розроблено обладнання, що імітує роботу котла ТЕС, та методику для вивчення процесів газообразивного зношування матеріалів. Швидкість абразиву становила 10–40 м/с, розмір його частинок – 200 мкм і менше, кут атаки – 30–90°. На розробленій нами установці можна одночасно в одному експерименті дослідити 50 зразків, що позитивно відрізняє нашу методику від інших, у яких в одному експерименті досліджується по одному чи максимум по 4 зразки.

Основними характеристиками, які визначають властивості матеріалів за підвищених температур, є жаростійкість та жароміцність. Під час дослідження жаростійкості встановлено, що електродугові покриття в перші години окиснюються інтенсивніше, ніж суцільний матеріал. Це пояснюється наявністю в покритті пор та міжламелярних прошарків, унаслідок чого фактична площа окиснення покриттів є у 20–25 разів більшою, ніж у сталі. У разі експозиції покриттів упродовж 50 год за температури 600 °С між ламелями покриття та на його поверхні формуються продукти окиснення. Кисень не проникає всередину покриття, а інтенсивність окиснення покриттів (рис. 2) на порядок менша порівняно зі сталевіою поверхнею.

Внутрішнє окиснення покриття відбувається через формування оксидних плівок завтовшки 100–150 нм, які міцно зв'язані з ла-

мелями. На поверхні покриття за підвищеної температури утворюється оксидна плівка, яка міцно зв'язана з тілом покриття внаслідок окиснення малолегованих ламелей. На відміну від неї, оксидна плівка, що формується на сталевій поверхні, має кілька шарів і межу поділу на сталі.

Залежно від кількісного вмісту легувальних елементів у покритті та на його поверхні формуються оксидні плівки різної морфології. На слаболегованих ламелях утворюється гематит рихлої голкоподібної форми. За вмісту хрому 6% та алюмінію 2% у покритті формується оксидна плівка гематиту, легована хромом та алюмінієм, купинчастої форми. За вмісту хрому 6% та алюмінію 14% у покритті формується суцільна монолітна оксидна плівка гематиту, легована алюмінієм (рис. 3).

Під час визначення жароміцності було встановлено, що внаслідок дисперсійного зміцнення гаряча мікротвердість зменшується лише на 100–150 МПа, а мікротвердість упродовж довготривалих експозицій – на 150–250 МПа і становить 550–600 МПа. Модуль пружності покриттів під дією температури зростає у 1,5–2,5 рази, що пропорційно відповідає збільшенню міжламелярної оксидної фази в покритті від 2–4% до 12–14%. Когезивна міцність зростає, що спричинено армуванням структури покриття оксидними плівками завтовшки 100–150 нм. Напруження розтягу за підвищених температур (до 600 °С) зменшуються у два етапи: I – рекристалізація і розпад аустеніту в ферит+перліт (10–20 год), II – окиснення (20–150 год), і в разі довготривалої експозиції трансформуються в напруження стиску.

Зменшення залишкових напружень розтягу та їх трансформація у напруження стиску підвищує опір покриттів до газоабразивного зносу. Під час досліджень газоабразивної зносостійкості електродугових покриттів зі сформованими поверхневими оксидними плівками гематиту чи гематиту, легованого алюмінієм або алюмінієм та хромом, було встановлено, що найвищий опір до газоабразивного зносу має монолітна суцільна оксидна плівка гематиту, легованого алюмінієм.

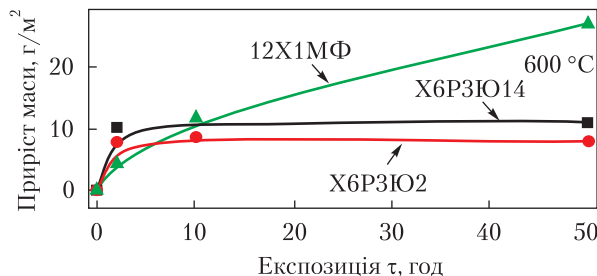


Рис. 2. Інтенсивність окиснення різних покриттів

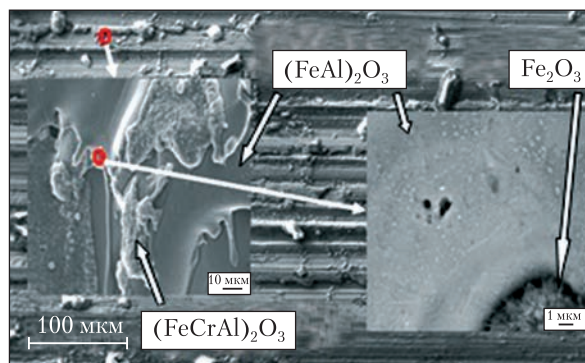


Рис. 3. Окиснена поверхня покриття з порошкового дроту X6P3Ю14

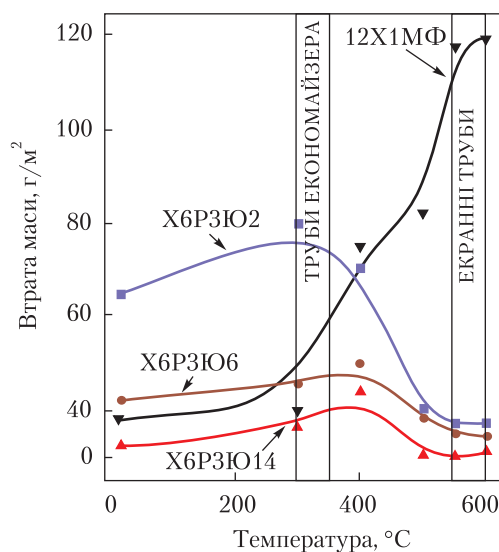


Рис. 4. Газоабразивна зносостійкість розроблених покриттів

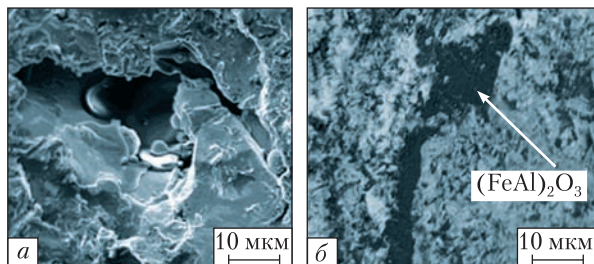


Рис. 5. Руїнування покриттів під дією абразиву

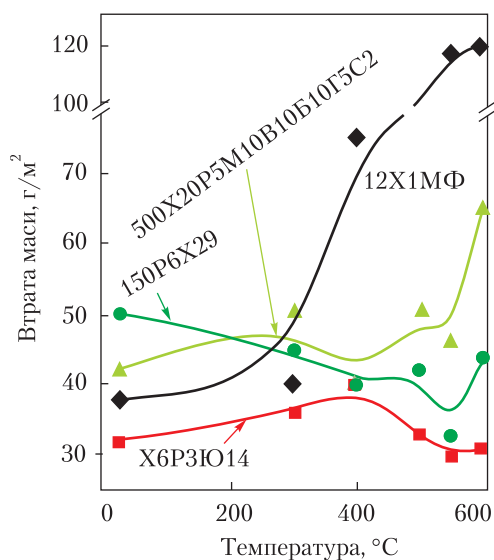


Рис. 6. Порівняння розроблених матеріалів зі світовими аналогами

Під дією абразиву в діапазоні температур 20–300 °С (рис. 4) руїнування покриттів відбувається в результаті зародження тріщин між ламелями покриття та їх подальшого викришування (рис. 5а). За температур 550–600 °С в покритті формуються продукти газової корозії різного складу, через що ламелі покриття руїнуються внаслідок поверхневого зрізання, а оксидна фаза – внаслідок зародження тріщин Герца, радіальних та поперечних тріщин (рис. 5а).

В умовах експлуатації труб економайзера та екранних труб електродугове покриття з порошкового дроту Х6Р3Ю14 має найвищий

опір до газоабразивного зносу (рис. 4) завдяки формуванню на поверхні (рис. 3) та між ламелями (рис. 5б) оксидних плівок  $(\text{FeAl})_2\text{O}_3$ .

У покриттях, напилених з використанням порошкових дротів виробництва відомих світових фірм, одразу після напилення вже спостерігаються мікротріщини, що зумовлено їх високою мікротвердістю (порядку 1000–1200 HV). Високий вміст хрому (20 і 29%) сповільнює процеси окиснення, і тріщини в покритті не заповнюються продуктами окиснення. Тому руїнування таких покриттів під дією абразиву за температур 20–300 °С відбувається внаслідок розростання наявних мікротріщин (рис. 6).

Опір до зносу високолегованих покриттів вищий, ніж сталі, однак ці покриття характеризуються більшою втратою маси порівняно з покриттям із розробленого нами порошкового дроту Х6Р3Ю14, в яких вміст легувальних елементів є оптимальним.

Отже, у доповіді обґрунтовано підходи до вибору порошкових дротів, які визначають такі характеристики довговічності електродугових покриттів в умовах роботи котлів ТЕС за температури 500–600 °С, як трансформація напружень розтягу в напруження стиску; дисперсійне зміцнення в умовах експлуатації; формування на поверхні оксидних плівок типу шпінелей –  $(\text{FeAl})_2\text{O}_3$ .

Для досліджень газоабразивного зносу матеріалів виготовлено експериментальне обладнання та розроблено експрес-методику, що дає можливість досліджувати одночасно 50 зразків в однакових умовах, максимально наближених до умов експлуатації поверхонь нагріву котлів ТЕС.

Розроблено порошковий дріт системи Fe-Cr-V-Al (ПД Х6Р3Ю14) та технологічну інструкцію для нанесення захисних покриттів. Дослідно-промислова перевірка нагрівних елементів котлів на Бурштинській (Україна), Остроленській та Опільській ТЕС (Польща) підтвердила високу ефективність запропонованої технології захисту й підвищення довговічності поверхонь нагріву у 2–2,5 раза.



## REFERENCES

## [СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Pokhmursky V.I., Student M.M., Gvozdecki V.M., Dzioba Yu.V., Sidorak I.I. In: *Service life and safety of structures, buildings and machinery*. (Kyiv, 2009). P. 135–139.  
[Похмурський В.І., Студент М.М., Гвоздецький В.М., Дзьоба Ю.В., Сидорак І.І. Розробка комплексного методу підвищення ресурсу теплообмінних поверхонь котлів електростанцій. У кн.: *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин*. К.: ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2009. С. 135–139.]
2. Pokhmursky V.I., Student M.M., Pokhmurska A.V., Ryabtsev I.A., Gvozdecki V.M., Stupnytsky T.R. Gasoabrasive wear resistance at elevated temperatures of coatings produced by thermal spraying. *The Paton Welding Journal*. 2013. (6): 15.  
[Похмурский В.И., Студент М.М., Гвоздецкий В.Н., Похмурская А.В., Рябцев И.А., Ступницкий Т.Р. Газоабразивная износостойкость при повышенных температурах покрытий, полученных дуговой металллизацией. *Автоматическая сварка*. 2013. № 6. С. 16–23.]
3. Pohmursky W.I., Student M.M., Hvozdetzky V.M., Pokhmurska H.V. Druty rdzeniowe serii FMI dla natryskiwania lukowego. *Welding Technology Review (Przegląd Spawalnictwa)*. 2013. 85(7): 6. <http://dx.doi.org/10.26628/ps.v85i7.213>
4. Student M.M., Hvozdetzky V.M., Holovchuk M.Y. Influence of chemical composition of powderwire on structure and determinants of coatings of different chemical composition. *Problems of Tribology*. 2017. (3): 56.  
[Студент М.М., Головчук М.Я., Гвоздецький В.М. Вплив хімічного складу порошкових дротів на структуру та зносостійкість покриттів різного хімічного складу. *Проблеми трибології*. 2017. № 3. С. 56–61.]
5. Hvozdetzky V.M., Sirak Ya. Ya., Zadorozhna Kh.R., Demianchuk Ya.M. Influence of drops size and flow rate on structure and properties of arc spraying coatings. *Physicochemical Mechanics of Materials*. 2017. (5): 110.  
[Гвоздецький В.М., Сірак Я.Я., Задорожна Х.Р., Дем'янчук Я.М. Вплив діаметра порошкових дротів на структуру та властивості електродугових покриттів. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2017. № 5. С. 110–115.]
6. Student M.M., Hvozdetzky V.M., Stupnytsky T.R., Dzioba Yu.V. Development of Electrometallic Equipment and Newest Consumables for Applying Protective and Reductive Coatings to Parts of Machinery Used in Mining, Transport, and Food Processing Industries. *Sci. Innov.* 2017. 13(6): 34. <https://doi.org/10.15407/scine13.06.034>  
[Студент М.М., Гвоздецький В.М., Ступницький Т.Р., Дзьоба Ю.В. Розроблення устаткування для електродугової металізації та новітніх витратних матеріалів для нанесення захисних і відновних покриттів на деталі гірничодобувної, транспортної та харчопереробної промисловості. *Наука Innov.* 2017. Т. 13, № 6. С. 36–40. <https://doi.org/10.15407/scin13.06.036>]
7. Stupnytsky T.R., Student M.M., Pokhmurska H.V., Hvozdetzky V.M. Optimization of chromium content in powder wires Fe–Cr–C, Fe–Cr–B by corrosion resistance of electric arc coatings. *Physicochemical Mechanics of Materials*. 2016. (2): 23.  
[Ступницький Т.Р., Студент М.М., Гвоздецький В.М., Похмурська Г.В. Оптимізація вмісту хрому в порошкових дротах систем Fe-Cr-C, Fe-Cr-B за корозійною тривкістю електродугових покриттів. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2016. № 2. С. 23–29.]
8. Student M., Hvozdetzky V., Stupnytsky T., Kalakhan O. The influence of structure on mechanical properties of arc sprayed coatings from cored wires with chromium content above 12%. *Journal of Lviv National Agrarian University*. 2015. 19: 38.  
[Студент М., Ступницький Т., Гвоздецький В., Калахан О. Вплив структури на механічні характеристики електродугових покриттів із порошкових дротів з вмістом хрому понад 12%. *Вісник ЛНАУ. Сер. Агроінженерні дослідження*. 2015. Вип.19. С. 66–72.]
9. Pokhmurska H.V., Student M.M., Hvozdetzky V.M. *Physicochemical Mechanics of Materials*. 2012. (9): 238.  
[Похмурська Г.В., Студент М.М., Гвоздецький В.М. Вплив газової корозії на газоабразивну зносостійкість покриттів системи Fe-Cr-B-Al за підвищених температур. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2012. Спецвип. 9. С. 238–242.]
10. Pokhmurskii V., Student M., Pokhmurska H., Gvozdecki V. Changes of residual stresses in arc spraying coatings during high temperature oxidation. *Surface Engineering (Inzynieria powierzchni)*. 2011. 16(3): 32.
11. Wielage B., Pokhmurska H., Student M., Gvozdeckii V., Stupnytsky T., Pokhmurskii V. Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures. *Surface and Coating Technology*. 2013. 220: 27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.12.013>

12. Patent of Ukraine No. 40723. Student M.M., Pokhmurska H.V., Sirak Ya.Ya., Hvozdet'skyi V.M. Powder-like wire for production of age-hardened electric-arc coatings. 27.04.2009.  
[Патент України № 40723. Студент М.М., Похмурська Г.В., Сірак Я.Я., Гвоздецький В.М. Порошковий дріт для одержання дисперснозміцнених електродугових покриттів. Опубл. 27.04.2009, бюл. № 8.]

*V.M. Gvozdecki*

Karpenko Physico-Mechanical Institute  
of the National Academy of Sciences of Ukraine (Lviv)

ELECTRIC ARC RESTORATIVE  
AND PROTECTIVE COATINGS FROM CORED WIRES

According to the materials of scientific report at the meeting  
of the Presidium of NAS of Ukraine, December 13, 2017

Electro-arc coatings, moderately doped with chromium, aluminum and silicon, have high heat resistance. The formation of oxide films  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{SiO}_2$  on their surface significantly reduces the oxidation rate. At elevated temperatures there is a synergistic effect of the action of erosion wear and oxidation of surfaces of parts, while oxides are destroyed by fast particles of fuel. The coatings provide the main characteristics of materials at elevated temperatures - heat resistance and high-temperature strength. The extraction of the dispersed phases of nanometer sizes provides the microhardness of the coatings at 450–500 HV. The electric arc coating from the powder wire X6B3Al14 has the highest resistance to gas-abrasive wear under operating conditions.

**Keywords:** spraying, electric arc coatings, powder wires, lamellae, oxidation, oxide films.