

# РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ І МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ТЕРМІНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ І НАДІЙНОСТІ ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГІЧНОГО І ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА ІНСТРУМЕНТІВ

М.С. Стороженко, О.П. Уманський, В.Є. Шелудько, Ю.В. Губін, Т.В. Курінна

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України. 03068, м. Київ, вул. Кржижановського 3.

E-mail: storozhenkomary@ukr.net

Встановлено, що технологія електроіскрового легування є перспективним методом зміцнення та відновлення деталей та технологічного та енергетичного обладнання: валів насосів та електродвигунів, робочих коліс, корпусів насосів, центрифуг, ін. Для підвищення ефективності запропонованої технології створено ряд електродних матеріалів  $\text{FeNiSi-Cr}_3\text{C}_2$ ,  $\text{WC-TiC-Mo}_2\text{C-Co-Cr}$  та  $\text{WC-TiC-Co-Cr-Ni-Al}$ ,  $\text{TiC-(Fe-Cr-Si-Al)}$ ,  $\text{NiCrBCuC-WC}$ ,  $\text{FeNiCrBSiC-TiB}_2$  та  $\text{FeNiCrBSiC-CrB}_2$ , які пройшли апробацію на промислових підприємствах України. Виявлено, що застосування розроблених електродів дозволяє одночасно підвищити технологічність процесу електроіскрового легування та збільшити ресурс деталей технологічного обладнання в 2,0...2,5 рази. Бібліогр. 10, рис. 4.

*Ключові слова:* електроіскрове зміцнення, покриття, зносостійкість, самофлюсівний сплав, диборід титану

Однією з основних причин зниження ресурсу експлуатації машин та механізмів є зношування деталей вузлів тертя. До 85 % дефектів та пошкоджень машин та промислового обладнання обумовлено інтенсивним зносом поверхневого шару деталей, який найбільшою мірою сприймає вплив навколишнього середовища і контактні навантаження при терті [1]. Передчасний вихід з ладу машин та механізмів внаслідок зносу в ряді випадків може призвести до масштабних катастроф техногенного характеру. Наприклад, внаслідок ерозійно-корозійного зносу технологічного обладнання магістральних трубопроводів та підприємств нафтопереробної промисловості відбуваються масштабні витoki нафтопродуктів, що чинять загрозу життю та здоров'ю людей [2]. Тому підвищення надійності та довговічності деталей машин і механізмів є актуальною науковою задачею, розв'язання якої нерозривно пов'язано зі збільшенням зносостійкості робочих поверхонь відповідальних деталей машин та механізмів.

Проект Р8.1 «Розробка технологій і матеріалів для електроіскрового нанесення покриттів з метою підвищення терміну експлуатації і надійності деталей технологічного і енергетичного обладнання та інструментів», що виконувався протягом 2016–2020 рр. в рамках цільової комплексної програми наукових досліджень «Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд» (Ресурс-2) НАН України, спрямовано на подовження ресурсу роботи деталей промислового обладнання та інструментів шляхом відновлення/підвищення

зносостійкості їх робочих поверхонь методом електроіскрового легування (ЕІЛ). Основні переваги методу: можливість локального нанесення покриттів з будь-яких струмопровідних матеріалів; висока міцність зчеплення легованого шару з матеріалом основи; простота проведення процесу; його низька енергоємність; невисока вартість обладнання. Серед недоліків методу – відносно низька продуктивність, підвищити яку можна застосуванням нових електродних матеріалів і сучасного технологічного обладнання.

Для ЕІЛ традиційно застосовують чисті метали (Mo, Cr), металеві сплави (Fe–Cr, Fe–C, Ni–Cr, Ni–Mo), графіт (ЕГ-2, ЕГ-4) та тверді сплави (WC–Co та WC–TiC–Co) [3]. При використанні електродів із чистих металів та металевих сплавів не вдається отримати покриття з необхідними високими експлуатаційними характеристиками. Тому для нанесення зносостійких покриттів на промислових підприємствах найбільш широко застосовуються електроіскрові покриття з твердих сплавів на основі карбіду вольфраму. Але вони не завжди задовольняють вимогам технологічності нанесення ЕІЛ-покриттів у зв'язку з їх високою ерозійною стійкістю та, відповідно, низьким коефіцієнтом масопереносу, а через дефіцитність вольфраму постає необхідність розробки безвольфрамових ЕІЛ-покриттів. Тому в даний час розвиток технології нанесення електроіскрових покриттів пов'язаний з розробкою безвольфрамових композиційних електродних матеріалів системи «тугоплавка сполука–металевий сплав» [4].

© М.С. Стороженко, О.П. Уманський, В.Є. Шелудько, Ю.В. Губін, Т.В. Курінна, 2020

В Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України розроблено ряд електродних композиційних матеріалів на основі та карбідів/боридів титану, молібдену, хрому і вольфраму та серійних самофлюсівних сплавів: FeNiSi-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, WC-TiC-Mo<sub>2</sub>C-Co-Cr та WC-TiC-Co-Cr-Ni-Al, TiC-(Fe-Cr-Si-Al), NiCrBCuC-WC, FeNiCrBSiC-TiB<sub>2</sub> та FeNiCrBSiC-CrB<sub>2</sub> [5-10]. В рамках проекту Р8.1 проведено дослідження кінетики масопереносу при електроіскровому легуванні сталі 45 для виявлення оптимальних складів розроблених електродів з точки зору забезпечення технологічності процесів електроерозійного зміцнення/відновлення робочих поверхонь деталей. Вивчено особливості формування структури та рельєфу поверхні ЕІЛ-покриттів з розроблених електродних матеріалів залежно від співвідношення тугоплавкої та металеві складових електродів, а також визначено їх зносостійкість в умовах тертя ковзання без мастила та абразивного зношування.

Зокрема, встановлено, що ЕІЛ-покриття на основі серійного самофлюсівного сплаву FeNiCrBSiC з добавками 20 % TiB<sub>2</sub> (FTB20) та 20 % CrB<sub>2</sub> (FCB20) формуються шляхом розплавлення металеві складові електроду з одночасним руйнуванням та подрібненням включень боридів та карборидів хрому з наступним відділенням частинок електроду та їх перенесенням на поверхню катода (сталі), де вони

приварюються до поверхні внаслідок мікрометалургійних процесів. При цьому не відбувається перемішування матеріалів електроду та сталеві підкладки. За рахунок подрібнення боридів та карборидів титану/хрому від 20...30 мкм до розмірів менше 1 мкм на поверхні сталі формуються наноструктуровані ЕІЛ-покриття (рис. 1). Поверхня ЕІЛ-покриттів FeNiCrBSiC-20 %TiB<sub>2</sub> та FeNiCrBSiC-20 %CrB<sub>2</sub> має рівномірний рельєф по всій поверхні зразків. В умовах тертя ковзання без мастила ЕІЛ-покриття з розроблених електродних матеріалів FTB20 та FCB20 мають в 2...3 рази вищу зносостійкість порівняно з покриттями з серійних електродів WC-6 %Co (рис. 2) [10].

За результатами роботи розроблено технічні умови ТУУ 25.9-05416930-049-014:2019 «Електроди FeNiCrBSiC-TiB<sub>2</sub> для електроіскрового зміцнення деталей триботехнічного призначення». При дослідно-виробничій перевірці в умовах КП «Київський метрополітен» виявлено, що нанесення електроіскрових покриттів з розробленого композиційного матеріалу FTB20 на робочі поверхні валу-шестерні Л-20877А ескалятора типу ЛТ-2 забезпечує подовження ресурсу його роботи в 2,0...2,5 рази (150...160 тис. км) (Акт випробувань від 12.04.2019). В результаті дослідно-виробничої перевірки на підприємстві «ТРИЗ» встановлено, що нанесення ЕІЛ-покриттів з розробленого композиційного ма-

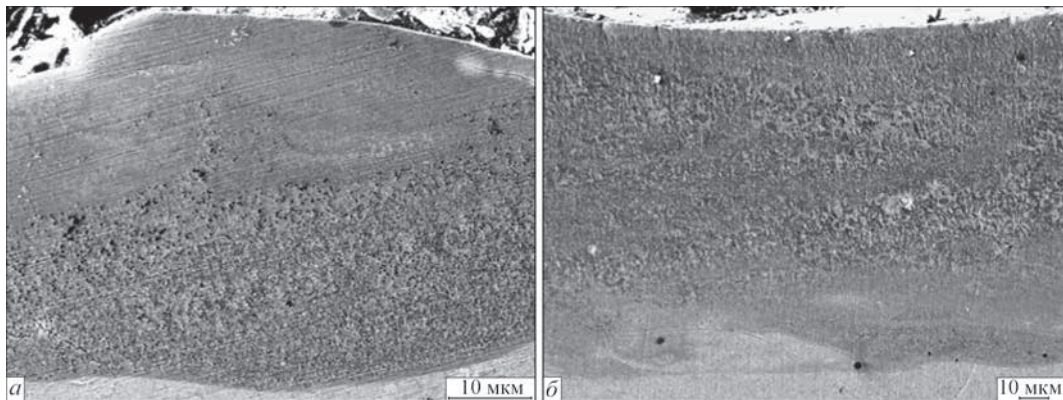


Рис. 1. Структура ЕІЛ-покриттів з розроблених електродів FTB20 (а) та FCB20 (б)

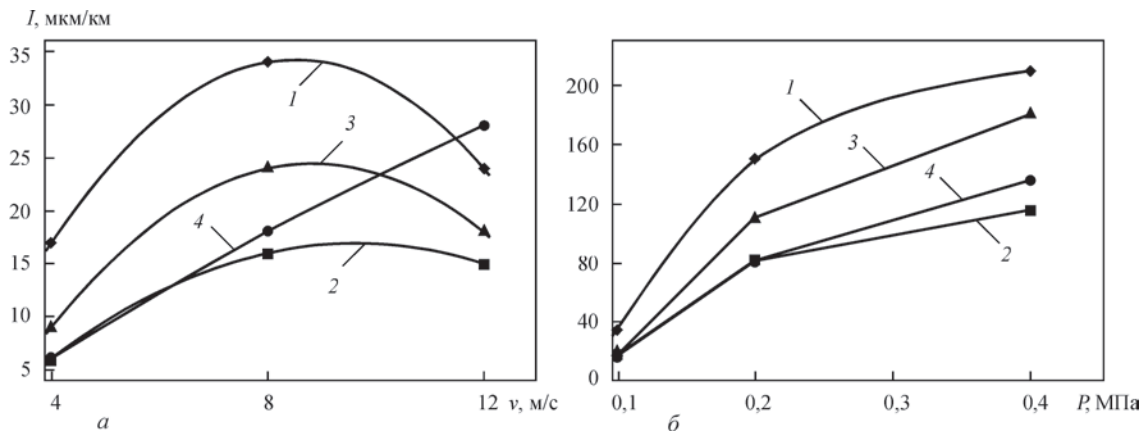


Рис. 2. Залежність інтенсивності зношування ЕІЛ-покриттів FeNiCrBSiC (1), FTB20 (2), FCB20 (3) і WC-6 % Co (4) від швидкості (а) та навантаження (б)

теріалу ФХТБ20 на робочі поверхні торцевих ущільнень марки ЦВС-30.50.01.200 для паливних насосів СЦЛ-20–24 електродами з композиційного матеріалу FTB20 системи FeNiCrBSiC–TiB (установка ALIER52: тривалість імпульсу 170 мкс; амплітудне значення струму імпульсу 200 А; енергія імпульсу 0,6 Дж) забезпечує подовження ресурсу роботи вузла ущільнення в 2,0...2,5 рази.

Процес електроерозійного зміцнення і відновлення деталей технологічного обладнання і інструментів з використанням розроблених електродних матеріалів NiBCuSi–WC, FeNiSi–Cr<sub>3</sub>C<sub>3</sub>, WC–TiC–Mo<sub>2</sub>C–Co–Cr та WC–TiC–Co–Cr–Ni–Al, TiC–(Fe–Cr–Si–Al) було застосовано на підприємствах «ТРІЗ» (м. Суми) та АТ «НВП Електромаш» (м. Суми). В результаті аналізу пошкоджень деталей на даних підприємствах встановлено, що серед найбільш поширених видів зносу належать каверни на поверхні лопаток робочих коліс відцентрових компресорів, корозійно-абразивний знос підшипникових шийок вала ротора насоса ЦНС-180 і ротора електродвигунів. Деталі цих агрегатів виготовляються із високоміцних сталей, їх робочі поверхні зміцнюються різними видами хіміко-термічної обробки. Однак експлуатація цих деталей відбувається в умовах тертя без мастила при питомих навантаженнях до 20 МПа, що призводить до їх інтенсивного зношування. Електроіскрове

зміцнення крупногабаритних деталей (електродвигунів, робочих коліс, корпусів насосів, центрифуг) з використанням розроблених електродів дозволило підвищити їх зносостійкість та ресурс роботи в 2,0...2,5 рази. Зокрема, електроіскрова обробка робочих поверхонь валів (рис. 3, а) електродами FeNiSi–Cr<sub>3</sub>C на установці ЕІЛ-8А дозволила збільшити максимальну товщину ЕІЛ-покривтів порівняно з використанням електродів WC-6 %Co (BK6) з 0,2 до 1,6 мм. Електродний матеріал NiBCuSi–WC був використаний на НВП «Електромаш» (м. Суми) для локального зміцнення та відновлення на установках «Елітрон-22А» і «Елітрон-52А» лемешів плугів (рис. 3, б) і посадочних місць промислових вентиляторів зі значними локальними пошкодженнями та зносом поверхні.

Крім того, на підприємстві «ТРІЗ» розроблено ряд технологічних процесів зміцнення деталей для компресорів з використанням графіту в якості електроду для ЕІЛ. Одним з найбільш відповідальних вузлів, що забезпечують герметичність компресорного агрегату, його безпечну і безвідмовну роботу, є вузол ущільнення. Дві третини всіх відмов компресорів відбуваються внаслідок порушення працездатності ущільнень. Тому в рамках виконання проекту Р8.1 було розроблено технологію зміцнення термооброблених втулок зі сталі 38Х2МЮА після



Рис. 3. Зміцнення деталей методом ЕІЛ з застосуванням розроблених електродів: шийка ротора електродвигуна з боку півмуфти (а) та леміш плуга (б)



Рис. 4. Зовнішній вигляд захисної втулки вузла ущільнення після ЕІЛ (а) і кільце плаваючого ущільнення відцентрового компресора (б)

посадки на вал шляхом електроіскрової обробки графітом. Аналогічно зміцнювали контактні торцеві поверхні ущільнювачів плаваючих кілець і відповідних деталей корпусу і кришки (рис. 4). Процес електроіскрової обробки проводили на установці «Елітрон-22А» при енергії розряду 0,5 Дж; глибина зміцненого шару складала 30...50 мкм, мікротвердість  $HV$  900–1100. Після чого, з метою зниження шорсткості і коефіцієнта тертя, проводилося легування контактних поверхонь сріблом при енергії розряду 0,05 Дж.

На базі установки ЭИЛВ-8 було створено макет механізованої установки (ЭИЛВ-8М) для зміцнення деталей обертання. Згідно рекомендацій співробітників Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича на підприємстві «ТРІЗ» виготовлено оснастку для механізації процесу ЕІЛ малогабаритних циліндричних деталей (деталей паливних насосів, робочих коліс компресорів і шийок вала ротора електродвигунів), в результаті чого вдалося суттєво підвищити продуктивність праці.

Таким чином, застосування запропонованих в рамках проекту технологічних рішень та розроблених електродів дозволяє підвищити технологічність процесу електроіскрового легування, знизити затрати праці та збільшити ресурс деталей енергетичного та технологічного обладнання в 2,0...2,5 рази. Розроблені електроіскрові покриття пройшли випробування на промислових підприємствах України (ООО «ТРІЗ» (м. Суми), НВП «Електромаш» (м. Суми), КП «Київський метрополітен», що підтверджується позитивними актами дослідно-виробничої перевірки.

*Робота виконана у рамках комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу та безпечної експлуатації конструкцій, споруд і машин» у 2016–2020 рр.*

### Список літератури

1. Holmberg K., Matthews A. (2009) *Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Application in Surface Engineering*. Switzerland, Elsevir.
2. Wu. X. (2004) Erosion-corrosion of various oil-refining materials in naphthenic acid. *Wear*, 256, 133–144.
3. Верхотуров А. Д., Подчерняева И. А., Прядко Л. Ф., Егоров Ф. Ф. (1988) *Электродные материалы для электроискрового легирования*. Москва, Наука.
4. Бовкун Г. А., Ткаченко Ю. Г. Юрченко Д. З. (1983) Безвольфрамовые электродные материалы для электроискрового легирования металлических поверхностей. *Электрофиз. обработка материалов*, 5, 27–29.
5. Тарельник В. Б., Паустовский А. В., Ткаченко Ю. Г. и др. Электродные материалы, композиционные и многослойные электроискровые покрытия из сплавов систем Ni–

- Cr, WC–Co и металлов. *Порошковая металлургия*, 9/10, 100–115.
6. Paustovskii A. V., Tkachenko Yu. G., Khristov V. G. et al. (2016) Materials for the Electrospark Strengthening and Reconditioning of Worn Metal Surfaces. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 1, 14–22.
7. Тарельник В. Б., Паустовский А. В., Ткаченко Ю. Г. (2017) Электроискровые покрытия на стальной основе и контактной поверхности для оптимизации рабочих характеристик баббитовых подшипников скольжения. *Электронная обработка материалов*, 1, 37–46.
8. Тарельник В. Б., Паустовский А. В., Ткаченко Ю. Г. и др. (2017) Электроискровое легирование графитом стальных поверхностей: технология, свойства, применение. *Электронная обработка материалов*. 4. 1–10.
9. Ткаченко Ю. Г., Юрченко Д. З., Тимофеева И. И., Бритун В. Ф. (2018) Влияние состава электродов из сплавов системы TiC–(FeCr–Al–Si) на формирование, фазовый состав и свойства износ- и жаростойких электроискровых покрытий на стали. *Порошковая металлургия*, 7/8, 119–129.
10. Уманський О. П., Стороженко М. С., Тарельник В. Б. та ін. (2020) Особливості формування електроіскрових покриттів системи NiFeCrBSiC–MeB2 на сталі. *Порошкова металургія*, 1/2, 86–95.

### References

1. Holmberg, K., Matthews, A. (2009) *Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Application in Surface Engineering*. Switzerland, Elsevir.
2. Wu, X. (2004) Erosion-corrosion of various oil-refining materials in naphthenic acid. *Wear*, 256, 133–144.
3. Verkhoturov, A.D., Podchernyaeva, I.A., Pryadko, L.F., Egorov, F.F. (1988) *Electrode materials for electrospark alloying*. Moscow, Nauka [in Russian].
4. Bovkun, G.A., Tkachenko, Yu.G., Yurchenko, D.Z. (1983) Tungsten-free electrode materials for electrospark alloying of metallic surfaces. *Elektrofiz. Obrabotka Materialov*, 5, 27–29 [in Russian].
5. Tarelnik, V.B., Paustovskii, A.V., Tkachenko, Yu.G. et al. (2016) Electrode materials, composite and multilayer electrospark coatings from alloys of Ni–Cr, WC–Co systems and metals. *Poroshk. Metallurgiya*, 9/10, 100–115 [in Russian].
6. Paustovskii, A.V., Tkachenko, Yu.G., Khristov, V.G. et al. (2016) Materials for the electrospark strengthening and reconditioning of worn metal surfaces. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 1, 14–22.
7. Tarelnik, V.B., Paustovskii, A.V., Tkachenko, Yu.G. (2017) Electrospark coatings on steel base and contact surface for optimization of service characteristics of whitemetal sliding bearings. *Electron. Obrabotka Materialov*, 1, 37–46 [in Russian].
8. Tarelnik, V.B., Paustovskii, A.V., Tkachenko, Yu.G. et al. (2017) Electrospark alloying of steel surfaces by graphite: Technology, properties, application. *Ibid.*, 4. 1–10 [in Russian].
9. Tkachenko, Yu.G., Yurchenko, D.Z., Timofeeva, I.I., Britun, V.F. (2018) Effect of composition of electrodes from alloys of TiC–(FeCr–Al–Si) system on formation, phase composition and properties of wear- and heat-resistant electrospark coatings on steel. *Poroshk. Metallurgiya*, 7/8, 119–129 [in Russian].
10. Umanskii, O.P., Storozhenko, M.S., Tarelnik, V.B. et al. (2020) Peculiarities of formation of electrospark coatings of NiFeCrBSiC–MeB2 on steel. *Ibid.*, 1/2, 86–95 [in Russian].

## DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES AND MATERIALS FOR ELECTRIC SPARK COATING WITH THE AIM OF INCREASING SERVICE LIFE AND RELIABILITY OF PARTS OF TECHNOLOGICAL AND POWER EQUIPMENT AND TOOLS

M.S. Storozhenko, O.P. Umansky, V.E. Sheludko, Yu.V. Gubin, T.V. Kurinna

Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine 3, Krzhyzhanovsky Str., 03150, Kyiv, Ukraine  
E-mail: storozhenkomary@ukr.net

It was established that the technology of electrospark alloying is a promising method of strengthening and restoration of parts and such technological and power equipment as shafts of pumps and electric motors, impellers, pump housings, centrifuges, etc. To increase the efficiency of the proposed technology, a number of electrode materials like FeNiSi – Cr<sub>3</sub>C<sub>5</sub>, WC – TiC – Mo<sub>2</sub>C – Co – Cr and WC – TiC – Co – Cr – Ni – Al, TiC – (Fe – Cr – Si – Al), NiCrBCuC – WC, FeNiCrBSiC – TiB<sub>2</sub> and FeNiCrBSiC – CrB<sub>2</sub> were created, which were tested at industrial enterprises of Ukraine. It was revealed that application of the developed electrodes provides a simultaneous increase in the manufacturability of the process of electrospark alloying with an increase in the life of parts of technological equipment by 2.0...2.5 times. 10 Ref., 4 Fig.

*Keywords: electrospark hardening, coating, wear resistance, self-flux alloy, titanium diboride*

Надійшла до редакції 28.09.2020

## 4<sup>th</sup> International Interdisciplinary Conference Advances in Metallurgical Processes and Materials Ukraine, Odesa, May 19-21, 2021



### Dear Colleagues, Readers, Friends!

Be sure that all together we will overcome COVID-19 and very soon you can again embrace your friends and shake hands with colleagues!

Consequently, we invite you to Odesa on May 19 – 21, 2021 for the 4<sup>th</sup> International Interdisciplinary Conference «Advances in Metallurgical Processes and Materials».

The previous three conferences were successfully held in 2007 in Dnepropetrovsk, 2015 – in Kyiv and 2018 – in Lviv.

The wide international participation of the experts from all over the world: from Japan, South Korea, China, India to the USA, Australia and South Africa and almost all European countries has demonstrated the high professional interest of metallurgists and material scientists in the interdisciplinary scientific forums as our AdMet.

### The main topics of the conference

- Thermodynamics of metallurgical processes
- innovative technologies including additives in metallurgy, welding and casting
- steelmaking and ladle treatment
- casting and solidification of the metals and alloys
- ecology and CO<sub>2</sub>-free metallurgy
- new steels and alloys, metal composites, nanomaterials
- modeling in metallurgy and metallurgical science
- automatic control and more ...

We are waiting for your abstract in English  
until December 1, 2020 on  
info@admet2021.com.ua

Follow the further information at  
<http://www.admet2021.com.ua>

*Possible changes to be displayed  
at the Conference site.*



From the International Organizing Committee,  
Professors Volodymyr Shatokha (NMetAU, Dnipro),  
Ganna Stovpchenko and Lev Medovar  
(E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv).

