

## ЕЛЕКТРОШЛАКОВА НАПЛАВКА ПОВЕРХОНЬ ВИРОБІВ КОМПОЗИЦІЙНИМ ЗНОСОСТІЙКИМ СПЛАВОМ

**Рибалко Іван Миколайович**

доктор технічних наук, доцент  
Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна  
ORCID: 0000-0002-3663-019X  
irybalko.ua@gmail.com

**Сайчук Олександр Васильович**

доктор технічних наук, професор  
Харківський державний професійно-педагогічний фаховий коледж імені В.І. Вернадського, м. Харків, Україна  
ORCID: 0000-0001-5118-838X  
sajchuksacha@gmail.com

**Захаров Андрій Вадимович**

аспірант  
Державний біотехнологічний університет, М. Харків, Україна  
ORCID: 0000-0001-9894-7355  
zakharovandrey1997@gmail.com

**Потоскаєв Олексій Миколайович**

аспірант  
Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна  
Alexei.Alexei@ukr.net

*Розроблено спосіб отримання зносостійких композиційних покриттів електрошлаковим наплавленням з використанням струмопідвідного кристалізатора і порошкових дротів, що містять тугоплавкі частинки дібориду титану TiB<sub>2</sub>. Вивчено термічні умови формування тонкого шару зносостійкого наплавленого металу та виявлено кінетику переходу в нього тугоплавких мікрочастинок із наповнювача порошкового дроту.*

*Ванна рідкого шлаку, маючи меншу, ніж у розплавленого металу, густину, постійно перебуває над поверхнею металевого розплаву, захищаючи його від впливу повітря. Краплі присадного металу, проходячи через шлак, піддаються металургійній обробці і очищаються від шкідливих домішок. Напрямок конвекції шлаку залежить від діаметра електрода: при наплавленні тонким електродом переважає вимушена електромагнітна конвекція, шлак опускається біля електрода і піднімається по краях шлакової ванни, при використанні товстого електрода переважає вільна теплова конвекція, шлак опускається по краях шлакової ванни і піднімається поблизу електрода.*

*Електроди можуть бути нерухомими, і їх розплавлення буде здійснюватись внаслідок постійного підняття шлакової і металеві ванн. Якщо ж електроди рухомі, то їх по мірі розплавлення безперервно подають у шлакову ванну. Можлива комбінація цих методів.*

*Способи ЕШН можна класифікувати за різними ознаками, з яких технологічні є основними. У процесі ЕШН розрізняють два способи формування наплавленого металу. Один з них передбачає вільне формування розплаву зварювальної ванни на плоскій горизонтальній поверхні, а другий полягає у використанні спеціальних формувальних пристроїв – кристалізаторів, виготовлених переважно з міді. У них розплавлений метал кристалізується в замкнутій порожнині. Для запобігання перегріванню кристалізатори охолоджують проточною водою, а їх поверхні, що контактують з розплавами шлаку і металу, покривають графітом та іншими матеріалами, оберігаючи їх від електрохімічної ерозії.*

*При ЕШН композитних покриттів в шлакову ванну сиплять зверху гранульований твердий сплав, температура плавлення якого вища за температуру плавлення металу-зв'язки, необхідність застосування якого обумовлена неприпустимістю вторинного розплавлення деяких твердих сплавів, через що наплавлення монопокрить з таких матеріалів неможлива.*

*Твердість і зносостійкість забезпечується частинками твердого сплаву, а метал-зв'язка утримує їх на поверхні деталі.*

**Ключові слова:** композиційний сплав, електрошлакове наплавлення, порошковий дріт, діборид титану.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.9>

**Вступ.** Композиційні металокерамічні сплави, в структуру яких впроваджено макро-, мікро- або наночастинки тугоплавких хімічних сполук, мають високі показники твердості та зносостійкості. Наплавлення таких сплавів на робочі поверхні деталей машин

та інструменту, що працюють в екстремальних умовах абразивного зношування, виконують з використанням покритих та трубчастих електродів, порошкових сумішей, а також керамічних флюсів, що містять у своєму складі частинки карбідів та боридів металів. Однак

застосовувані для цих матеріалів дугові та газополум'яні способи наплавлення мають низьку технологічність і продуктивність. Більш ефективні механізовані способи електрошлакового наплавлення (ЕШН) порошковими дроти (ПП), що містять в наповнювачі тугоплавкі тверді компоненти.

Цілеспрямовано керувати якістю одержуваного наплавленого металу можна з використанням технології ЕШН в струмопідвідному кристалізаторі (СПК), що забезпечує регулювання тепловиділення в шлаку поблизу металевої ванни, так і в області плавлення наплавочних матеріалів. Це дає можливість при мінімальному та рівномірному проплавленні основного металу створювати умови для гарантованого переходу тугоплавких частинок наплавлений метал.

Мета роботи полягає у дослідженні процесу формування тонкого шару зносостійкого металу при ЕШН у горизонтальному положенні з використанням СПК та ПП, що містять частинки дибориду титану TiB<sub>2</sub>.

**Матеріали і методи досліджень.** Зразки сплавів наплавляли з використанням ПП, порожнистих графітових електродів та водоохолоджуваного двосекційного СПК (рис. 1). Графітові електроди, струмопідвідна секція кристалізатора та виріб включені в мережу електроживлення постійним струмом за двоконтурною схемою (Saychuk O.V., et al., 2022). Дріт діаметром 3 мм виготовляли зі сталеві стрічки товщиною 0,3 мм. Як наповнювач ПП використовували порошки нікелю, ферохрому, графіту, а також дибориду титану в кількості 25 мас. % із середнім розміром частинок 35 мкм.

Вивчення структури металу проводили із використанням оптичного мікроскопа Axiovert 40 MAT. Зміст і розподіл легуючих елементів структурних складових наплавленого металу визначали на електронному растровому мікроскопі Versa 3D.

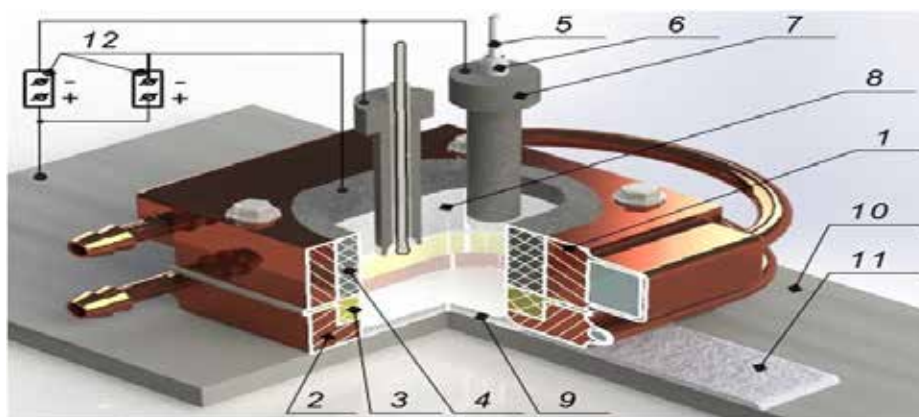
Випробування наплавленого металу на абразивне зношування при терті про жорстко закріплений абразив проводили на лабораторній машині. Статичне навантаження на зразок складало 0,937 МПа. Поверхня, що стирає, являла собою шліфувальний папір із зернистістю абразиву Р100. Коефіцієнт відносної зносостійкості

металу визначали як відношення втрати маси експериментального зразка до втрати маси еталона (сталь 45 відпаленому стані).

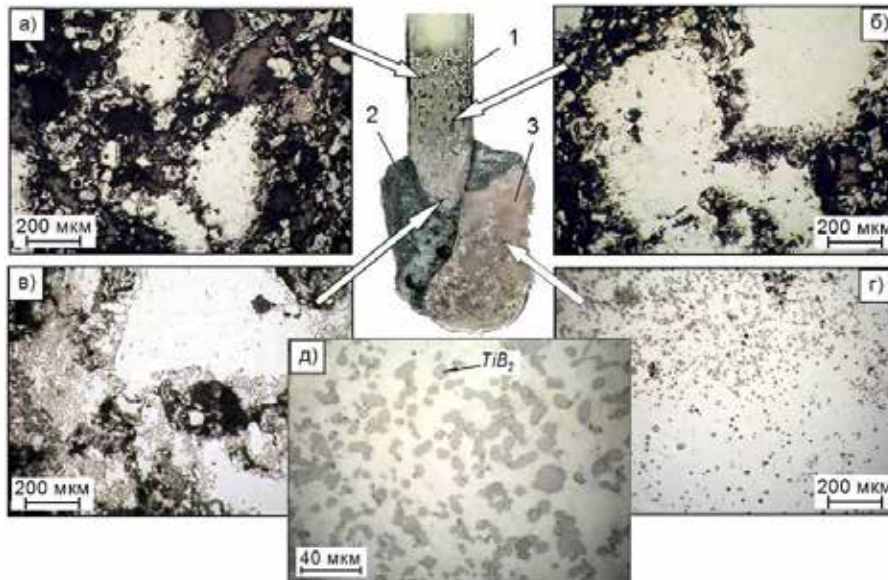
**Результати досліджень.** Експериментально встановлено, що при використанні двоконтурної схеми електроживлення кристалізатора і електродів постійним струмом теплова потужність, що виділяється в шлаку при протіканні струму через контур «струмопідвідна секція – виріб», дозволяє забезпечити стійку підтримку електрошлакового процесу, а також дає можливість підвищити однорідність температурного поля осьового перерізу шлакової ванни, що обумовлює рівномірну глибину проплавлення основного металу та сталість хімічного складу по ширині наплавленого шару. Це досягається при використанні в конструкції СПК кільцеподібного керамічного елемента, розташованого в проточці формує секції, який впливає на розподіл струму, що протікає через шлак, з поверхні струмопідвідної секції кристалізатора.

Моделювання топології електричних полів у шлаку, виконане за методикою (Skoblo T.S., et al., 2021.), показало, що така конструкція СПК дає можливість збільшити тепловиділення в обсязі шлаку, що розташовується по периметру металевої ванни, за рахунок 2-3-кратного підвищення щільності струму в цій галузі порівняно з іншим обсягом шлакової ванни. Це сприяє підвищенню температури зварювальної ванни та зменшенню поверхневого натягу на міжфазних межах у найбільш важливій

– периферійній зоні зварювальної ванни, де підвищено швидкість тепловідведення в кристалізатор (Stepanov V.V. et al 1997; Lutyu I.V et al., 2005; Podgaetskiy V.V. et al., 1997; Yu.V. Latash et al., 1970; Nikitin B.M. et al., 1989; Zhmoidin G.I. 1989; Yu.M. Kuskov et al., 2018; Yu.M. Kuskov et al., 2020; Paton B. E et al., 1976) При цьому теплова потужність, що виділяється в приелектродних областях шлакової ванни, витрачається переважно на плавлення електронейтральних дротів. Утворюються при сумісному електромагнітному впливі від струмопідвідної секції кристалізатора і електродів циркуляційні потоки в шлаковій ванні сприяють її перемішування та зниження температурних градієнтів



**Рис. 1 – Схема процесу ЕШН: 1, 2 – струмопідвідна і формуюча секції кристалізатора відповідно; 3 – керамічний елемент; 4 – графітове футерування; 5 – ПП; 6 – керамічна трубка; 7 – порожнистий графітовий електрод; 8 – шлакова ванна; 9 – металева ванна; 10 – виріб; 11 – наплавлений метал; 12 – джерела струму**



**Рис. 2.** Мікроструктури характерних ділянок оплавленого торця ПП (а-г), що містить 25 мас. %  $TiB_2$ , та наплавленого металу (д): 1 – ПП; 2 – шлак; 3 – металева крапля

(Paton B. E et al., 1980; Paton B. E et al., 1982; Chen Ch. S et al., 1989; Latash Yu. V et al., 1987; Mironov Yu. M et al., 2002; Paton B. E., et al., 1986; Dudko D. A et al., 1986; Ksendzyk G.V et al., 1975) Завдяки цьому забезпечується якісне формування тонких (від 2,5 мм) та широких (від 50 мм) шарів із металевих та металокерамічних сплавів при відносно невеликому (до 15–20%) проплавленні основного металу.

Встановлено, що для формування однорідного теплового поля в шлаковій ванні необхідно використовувати два порожнисті графітові електроди, які слід розташовувати на міжцентровій відстані, що дорівнює 1,7...2,5 від величини зовнішнього діаметра електрода (Paton B.E, 1974; Latash Yu.V et al., 1970; B.E. Paton, 1980; Sushchuk-Slyusarenko I.I., et al., 1989; B.E. Paton, 1974; Gusev A.I et al., 2016). Регулювання величини струму, що протікає через електроди, дозволяє в широких межах змінювати температуру шлаку в цих зонах, що дає можливість створити оптимальні теплові умови для плавлення дротів і зменшити інтенсивність розчинення тугоплавких мікрочастинок  $TiB_2$ , що містяться в наповнювачі (Gusev A.I et al., 2016; Gusev A.I et al., 2017; Gusev A.I & Kibko N.V.2017; Azzoni M, 2009).

Дослідженнями кінетики переходу частинок  $TiB_2$  з наповнювача ПП в метал крапель, що утворюються при її розплавленні, встановлено, що на початковому етапі плавлення ПП відбувається спікання наповнювача з розплавленням його обсягів, що не містять  $TiB_2$  порошок (рис. 2, а). У міру наближення до високотемпературної області в шлаку об'єм рідкої фази в наповнювачі

збільшується, вона просочує порошок  $TiB_2$ , частинки якого розташовуються переважно на межі розплавів (рис. 2, б, в). Накопичення розплаву призводить до формування на торці дроту краплі, в якій частинки  $TiB_2$  під впливом інтенсивних течій гідродинамічних досить рівномірно розподіляються за її обсягом (рис. 2, г).

Також виявлено, що за активної взаємодії з металевим розплавом електрохімічне розчинення частинок  $TiB_2$  починається вже на стадії формування краплі на торці дроту. При переході крапель у металеву ванну внаслідок зниження температури та інтенсивності конвекції у ній швидкість розчинення частинок  $TiB_2$  уповільнюється. Частини, що не розчинилися, служать центрами кристалізації, навколо яких утворюються великі первинні кристаліти інших боридів і карбобридів. Після кристалізації розплаву в металі формується структура металокераміки, армованої частинками  $TiB_2$  (рис. 2, д), з твердістю 52–54 HRC та коефіцієнтом відносної зносостійкості 9,2. Висока зносостійкість наплавленого покриття обумовлена великим (до 92 об. %) об'ємним вмістом у ньому твердих зміцнювальних фаз, що сприяють створенню гетерогенної структури штучного композиту.

**Висновки.** Використання при ЕШН двоконтурної схеми електроживлення СПК і порожнистих графітових електродів постійним струмом, а також електронейтральної ПП з порошком  $TiB_2$  у складі наповнювача забезпечує бездефектне формування на горизонтальній поверхні тонкого шару наплавленого металокерамічного сплаву, що володіє підвищеною стійкістю до абразивного зношування.

#### **Бібліографічні посилання:**

1. Saychuk, O.V., Rybalko, I.M., Zakharov, A.V. (2022). Elektroshlakove naplavlennia na postiinomu strumi v strumovomupidvidnomu krystalizatori elektrodom velykoho pererizu [Electroslag deposition on direct current in a current-driven crystallizer with a large cross-section electrode] International Scientific and Practical Conference "Modern Directions and Movements in Science": Conference proceedings, October 6-8. Luxembourg, Luxembourg. P. 229–237. (in Ukrainian).

2. Skoblo, T.S., Rybalko, I.M., Zakharov, A.V. (2021). Analiz elektroshlakovoho naplavlennia metalu z maloiu tovshchynoiu vidnovliuvaino-zmitsniuiuchoho robochoho sharu detali. [Analysis of electros slag deposition of metal with a small thickness of the restoring and strengthening working layer of the part] Information-analytical international technical journal "Industry in Focus". Kharkiv, No. 10. P. 54–56. (in Ukrainian).
3. Stepanov, V.V. (1997). Plotnost rasplavlennykh flyusov dlya elektroshlakovogo pereplava i nagreva [Density of molten fluxes for electros slag remelting and heating]. Kyiv : Automatic welding. No. 2. (in Russian).
4. Lutyi, I.V. Elektroshlakovaya plavka i rafinirovaniye metallov [Electros slag smelting and refining of metals]. Kyiv : Nauk. Dumka. No. 7. V. 5. No. 2. S. 22– 24. (in Russian).
5. Podgaetskiy, V.V. (1997). Svarochnyye flyusy [Welding fluxes]. Kyiv : Technika. No. 4. No. 3. P. 52–60. (in Russian).
6. Latash, Yu.V. Ochistka metalla ot nemetallicheskiikh vklucheniy pri elektroshlakovom pereplave [Purification of metal from non-metallic inclusions during electros slag remelting]. Kyiv: Automatic welding. No. 9. No. 23. P. 34–56. (in Russian).
7. Nikitin, B.M. (1997). O fazovom sostave forsoderzhashchikh shlakov elektroshlakovogo pereplava [On the phase composition of fluorine-containing slags of electros slag remelting]. AS USSR. Metals. No. 6. No. 5. P. 54–56. (in Russian).
8. Zhmoidin, G.I. (1989). Plavkost forsoderzhashchikh shlakov [Fusibility of fluorine-containing slags]. AS USSR. Metals. No. 6. P. 123–134. (in Russian).
9. Kuskov, Yu. M., Skorokhodov, Yu. M., Ryabtsev, I.A., Sarychev, I.S. (2018). Elektroshlakove naplavlennya [Electros slag welding]. Kyiv : Science and technology. No. 14. P. 67–68. (in Ukrainian).
10. Kuskov, Yu.M., Ryabtsev, I.A., Kuzmenko, O.G., Lentugov, I.P. (2020). Elektroshlakovi tekhnolohiyi naplavlennya ta pererobky metalu ta metalovmisnykh vidkhodiv [Electros slag technologies of welding and processing of metal and metal wastes]. Kyiv : Interservice. No.11. P. 22–23. (in Ukrainian).
11. Paton, B. E., Medovar, B. I. (ed.). (1976). Elektroshlakovyye pechi [Electros slag furnaces]. Kyiv : Naukova Dumka. No. 4. (in Russian).
12. Paton, B. E. (ed.). (1980). Elektroshlakovaya svarka i naplavka [Electros slag welding and surfacing]. Moscow: Mechanical engineering. No. 2. (in Russian).
13. Paton, B. E., Medovar, B. I. (1982). Elektroshlakovaya tekhnologiya za rubezhom [Electros slag technology abroad]. Kyiv : Naukova Dumka. No. 1. (in Russian).
14. Chen, Ch. S., Gao, R. F. (1989). Issledovaniye elektroshlakovogo pereplava v sostavnoy kristallizatore s futerovannoy verkhney chast'yu [Study of electros slag remelting in a composite mold with a lined top]. Problems spec. Electrometallurgy. No. 7. (in Russian).
15. Latash, Yu. V., Matyakh, V. N. (1987). Sovremennyye metody polucheniya slitkov osobo vysokogo kachestva [Modern methods for producing high quality ingots]. Kyiv : Naukova Dumka. No. 6. (in Russian).
16. Mironov, Yu. M. (2002). Vliyaniye roda toka na protsessy v elektroshlakovykh ustanovkakh [Influence of current type on processes in electros slag installations]. Kyiv : Electrometallurgy. No. 8. (in Russian).
17. Paton, B. E., Medovar, B. I. (1986). Metallurgiya elektroshlakovogo protsessa [Metallurgy of the electros slag process]. Kyiv : Naukova Dumka. No. 8. (in Russian).
18. Dudko, D. A., Rublevsky, I. N. (1986). Vliyaniye roda i polyarnosti toka na metallurgicheskiye protsessy pri elektroshlakovoy svarke [Effect of current type and polarity on metallurgical processes in electros slag welding]. Kyiv : Naukova Dumka. No. 9. (in Russian).
19. Ksendzyk, G.V. (1975). Tokovedushchiy kristallizator, obespechivayushchiy vrashcheniye shlakovoy vanny [Current-carrying mold providing rotation of the slag pool]. Kyiv : Specialist Electrometallurgy. No.2. (in Russian).
20. Paton, B.E. (1974). Tekhnologii elektrosvarki metallov i splavov plavleniyem [Technologies for electric welding of metals and alloys by fusion]. Moscow: Mashinostroenie. №.3. (in Russian).
21. Latash, Yu. V., Medovar, B.I. (1970). Elektroshlakovyy pereplav [Electros slag remelting]. Kyiv : Naukova Dumka. №. 5. (in Russian).
22. Paton, B. E. (1980). Elektroshlakovaya svarka i naplavka [Electros slag welding and surfacing]. Kyiv : Naukova Dumka. №.11. (in Russian).
23. Sushchuk-Slyusarenko, I.I., Lychko, I.I., Kozulin, M.G. (1989). Elektroshlakovaya svarka i naplavka v remontnykh rabotakh [Electros slag welding and surfacing in repair work]. Kyiv : Naukova Dumka. № 12. (in Russian).
24. Paton, B.E. (1974). Tekhnologiya elektrosvarki metallov i splavov plavleniyem [Technology of electric welding of metals and alloys by melting]. Kyiv : Naukova Dumka. № 14. (in Russian).
25. Gusev, A.I., Kibko, N.V., Kozyrev, N.A., Popova, M.V., Osetkovsky, I.V. (2016). Issledovaniye svoystv naplavlennogo metalla poroshkovymi provolokami 40GMFR i 40KH3G2MF [Investigation of the properties of deposited metal with flux-cored wires 40GMFR and 40Kh3Zh2MF]. Moskov: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. № 1. (in Russian).
26. Gusev, A.I., Kibko, N.V., Popova, M.V., Kozyrev, N.A., Osetkovsky, I.V. (2016). Struktura i svoystva naplavlennykh sloyev, poluchennykh s ispol'zovaniyem poroshkovykh provolok 40GMFR i 40KH3G2MF [Structure and properties of deposited layers obtained using flux-cored wires 40GMFR and 40Kh3Zh2MF]. Moskov : Bulletin of the Mining and Metallurgical Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Department of Metallurgy: Sat. scientific tr. Issue. № 36. (in Russian).
27. Gusev, A.I., Kozyrev, N.A., Kibko, N.V., Popova, M.V., Kryukov, R.E. (2017). Issledovaniye struktury i svoystv metalla, naplavlennogo poroshkovoy provolokoy sistemy Fe - C - Si - Mn - Cr - Mo - Ni - V - Co [Investigation of the structure and properties of metal deposited with a flux-cored wire of the Fe - C - Si - Mn - Kr - Mo - Ni - B - Co system]. Moskov : Actual problems in mechanical engineering. V. 10. No. 2. S. 31–32. (in Russian).
28. Gusev, A.I., Kibko, N.V., Popova, M.V., Kozyrev, N.A., Osetkovsky, I.V. (2017). Naplavka poroshkovymi provolokami C - Si - Mn - Mo - V - B i C - Si - Mn - Cr - Mo - V detaley gorno-shakhtnogo oborudovaniya [Surfacing with flux-cored wires

C - Si - Mn - To - B - B and C - Si - Mn - Kr - To - V of mining equipment parts]. Moskov: Izv. universities. Ferrous metallurgy V. 60. No. 4. S. 318–323. (in Russian).

29. Azzoni, M. (2009). Napravleniya i razrabotki v oblasti tipov tverdykh faz dlya primeneniya v abrazionnykh otlozheniyakh protiv istiraniya [Trends and developments in the field of solids types for application in abrasion deposits against attrition]. Moskov: WeldInter national. V. 23. P. 706–716. (in Russian).

30. Klimpel, A., Dobrzanski, L. A., Janicki, D., Lisiecki, A. (2005). Stoykost k istiraniyu metalloporoshkovykh provolok GMA s naplavkoy [Abrasion resistance of GTA metal-cored wires with hardfacing]. Moskov: Materials Processing Technology. V. 164-165. P. 1056–1061. (in Russian).

**Rybalko I. M.**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

**Saychuk O. V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, V.I. Vernadskiy Kharkiv State Professional and Pedagogical Applied College, Kharkiv, Ukraine

**Zakharov A. V.**, Postgraduate, State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

**Potoskaev O. M.**, Postgraduate, Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

#### **Electroslag surface of product surfaces with composite wear-resistant alloy**

A method of obtaining wear-resistant composite coatings by electroslag surfacing using a current-driven crystallizer and powder wires containing refractory particles of titanium diboride TiB<sub>2</sub> has been developed. The thermal conditions of the formation of a thin layer of wear-resistant deposited metal were studied and the kinetics of the transition into it were revealed refractory microparticles from powder-coated wire filler.

The bath of liquid slag, having a lower density than that of the molten metal, is constantly above the surface of the metal melt, protecting it from the influence of air. Drops of filler metal, passing through the slag, undergo metallurgical processing and are cleaned of harmful impurities. The direction of slag convection depends on the diameter of the electrode: when welding with a thin electrode, forced electromagnetic convection prevails, the slag sinks near the electrode and rises along the edges of the slag bath, when using a thick electrode, free thermal convection prevails, the slag sinks along the edges of the slag bath and rises near the electrode.

The electrodes can be stationary, and their melting will be carried out as a result of the constant rise of the slag and metal baths. If the electrodes are movable, they are continuously fed into the slag bath as they melt. A combination of these methods is possible.

The methods of ESN can be classified according to various features, of which technological ones are the main ones. In the process of ESN, two methods of forming the deposited metal are distinguished. One of them involves the free formation of the weld pool melt on a flat horizontal surface, and the second consists in the use of special forming devices – crystallizers made mainly of copper. In them, the molten metal crystallizes in a closed cavity. To prevent overheating, crystallizers are cooled with running water, and their surfaces in contact with slag and metal melts are covered with graphite and other materials, protecting them from electrochemical erosion.

In the case of ESN of composite coatings, a granulated hard alloy is poured from above into the slag bath, the melting temperature of which is higher than the melting temperature of the bond metal, the need for which is due to the inadmissibility of secondary melting of some hard alloys, due to which the surfacing of monocoats from such materials is impossible.

Hardness and wear resistance are provided by hard alloy particles, and the metal bond holds them on the surface of the part.

**Key words:** composite alloy, electroslag surfacing, powder wire, titanium diboride.