



**Andriy V. Zakharov**  
Захаров  
Андрій  
Вадимович

УДК 621.793:621.791.75:669.017.3:620.193

## **REGULARITIES OF FORMING WEAR-RESISTANT COATINGS BY ELECTROSLACK SURFACE TREATMENT WITH DISPERSED MODIFYING ADDITIVES**

### **ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ ПРИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОМУ НАПЛАВЛЕННІ З ДИСПЕРСНИМИ МОДИФІКУЮЧИМИ ДОМІШКАМИ**

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2026.1\(22\).01](https://doi.org/10.15589/smi2026.1(22).01)



**Ivan M. Rybalko**  
Рибалко Іван  
Миколайович

**Andriy V. Zakharov<sup>1</sup>**

Захаров Андрій Вадимович, докт. філос.  
zakharovandrey1997@gmail.com  
ORCID: 0000-0001-9894-7355

**Ivan M. Rybalko<sup>2</sup>**

Рибалко Іван Миколайович, докт. техн. наук, доц.  
irybalko.ua@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-3663-019X

**Oleksandr V. Tihonov<sup>2</sup>**

Тіхонов Олександр Всеволодович,  
канд. техн. наук, доц.  
texas2002@btu.kharkiv.ua  
ORCID: 0000-0001-7209-8375

**Oleksandr V. Saychuk<sup>3</sup>**

Сайчук Олександр Васильович, докт. техн. наук,  
проф.sajchuksacha@gmail.com  
ORCID: 0000-0001-5118-838X



**Oleksandr V. Tihonov**  
Тіхонов  
Олександр  
Всеволодович

<sup>1</sup>*V.I. Vernadsky Kharkiv State Professional and Pedagogical Applied College, Kharkiv*

<sup>2</sup>*State Biotechnological University, Kharkiv*

<sup>3</sup>*Poltava State Agrarian University, Poltava*

<sup>1</sup>*Харківський державний професійно-педагогічний фаховий коледж імені В.І. Вернадського, м. Харків*

*Державний біотехнологічний університет, м. Харків*

<sup>3</sup>*Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава*



**Oleksandr V. Saychuk**  
Сайчук  
Олександр  
Васильович

**Анотація.** У роботі узагальнено та експериментально обґрунтовано закономірності формування зносостійких покриттів, отриманих електрошлаковим наплавленням у струмопідвідному кристалізаторі з використанням дисперсних модифікуючих домішок. Показано, що ключову роль у формуванні структури й експлуатаційних властивостей наплавленого шару відіграють умови тепло- і масоперенесення у шлаковій ванні, які визначаються електричними параметрами процесу, конструкцією кристалізатора та складом флюсу. Встановлено, що тепловиділення внаслідок омичних втрат електричної енергії при проходженні струму через електропровідний шлак у поєднанні з керованим тепловідводом забезпечує стабільність температурного поля, завершення металургійних процесів та формування щільного бездефектного шару.

Обґрунтовано функціональну роль компонентів флюсу АНФ-29 як активного регулятора тепло- і масоперенесення, зокрема вплив електропровідності та в'язкості шлаку на інтенсивність конвективного перемішування, транспорт і диспергування модифікуючих домішок, а також характер взаємодії на межі «шлак–метал». Показано, що застосування додаткового індукційного підігріву дозволяє збільшити час перебування металу в перегрітому стані та зберегти необхідну плинність до моменту кристалізації, проте потребує оптимізації з метою запобігання локальному перевищенню температури й надмірному розчиненню дисперсної фази.

Експериментально підтверджено, що узгодження інтенсивності тепловиділення, тепловідводу через кристалізатор і параметрів масоперенесення створює умови для цілеспрямованого структуроутворення, що забезпечує підвищення твердості та зносостійкості наплавлених покриттів. Отримані результати мають практичну значущість для відновлення та зміцнення деталей, які працюють в умовах абразивного та абразивно-корозійного зношування. Уточнено інженерні рекомендації щодо вибору складу порошкових дротів і режимів ЕПН-СПК для забезпечення твердості 58–62 HRC та приросту зносостійкості до 44%. Отримані закономірності можуть бути використані під час зміцнення й ремонту валів, втулок та елементів портового обладнання, що працюють у режимах гідроабразивного й корозійно-ерозійного зношування.

**Ключові слова:** електрошлакове наплавлення; струмопідвідний кристалізатор; порошкові дроти; дисперсні модифікатори; NbC; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; ZrO<sub>2</sub>; зносостійкість; структуроутворення.

**Abstract.** The paper summarises and experimentally substantiates the patterns of formation of wear-resistant coatings obtained by electroslog surfacing in a current-fed crystalliser using dispersed modifying additives. It is shown that the conditions of heat and mass transfer in the slag bath, which are determined by the electrical parameters of the process, the design of the crystallizer and the composition of the flux, play a key role in the formation of the structure and operational properties of the deposited layer. It has been established that heat generation due to ohmic losses of electrical energy when current passes through electrically conductive slag, combined with controlled heat removal, ensures the stability of the temperature field, the completion of metallurgical processes and the formation of a dense, defect-free layer.

The functional role of ANF-29 flux components as an active regulator of heat and mass transfer, in particular the influence of electrical conductivity and slag viscosity on the intensity of convective mixing, transport and dispersion of modifying additives, as well as the nature of interaction at the slag-metal interface, has been substantiated. It has been shown that the use of additional induction heating allows to increase the time the metal remains in a superheated state and to maintain the necessary fluidity until crystallisation, but it needs to be optimised in order to prevent local temperature exceedances and excessive dissolution of the dispersed phase.

It has been experimentally confirmed that coordinating the intensity of heat release, heat transfer through the crystallizer, and mass transfer parameters creates conditions for targeted structure formation, which increases the hardness and wear resistance of deposited coatings. The results obtained are of practical importance for the restoration and strengthening of parts operating under conditions of abrasive and abrasive-corrosion wear. Practical implications include repair hardfacing of shafts, bushings and port equipment components operating under hydro-abrasive and corrosion-erosion wear. Recommendations are given for selecting flux-cored wire composition and ESCCM parameters to achieve 58–62 HRC and up to 44% improvement in wear resistance.

**Key words:** electroslog surfacing; current-conducting mould; flux-cored wire; disperse modifiers; NbC; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; ZrO<sub>2</sub>; microstructure; wear resistance.

## References

- [1] Zakharov, A. V. (2025). Zastosuvannya modyfikuiuchykh prysadyk ta yikh vvedennia u vidnovliuvalni pokryttia dlia pidvyshchennia ekspluatatsiinoi stiiikosti [Application of modifying additives and their introduction into restorative coatings to improve operational durability]. Kharkiv. 276 p. [in Ukrainian].
- [2] Rybalko, I. M., Tihonov, O. V., & Zakharov, A. V. (2024). Pidvyshchennia dovhovichnosti robochykh orhaniv gruntoobrobnykh mashyn elektroshlakovym naplavlenniam u strumopidvidnomu krystalizatori [Improving the durability of working bodies of soil-cultivating machines by electroslog surfacing in a current-supplying crystallizer]. *Visnyk Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 6(149), 166–173. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.6.20> [in Ukrainian].
- [3] Babinets, A. A., Ryabtsev, I. O. (2021). Influence of modification and microalloying on deposited metal structure and properties [Vplyv modyfikuvannya ta mikrolehuvannya na strukturu i vlastyvoli naplavlennoho metalu]. *The Paton Welding Journal*, (10), 3–10. <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.10.01>
- [4] Babinets, A. A., Ryabtsev, I. O. (2021). Classification of methods of modification and microalloying of deposited metal [Klasifikatsiia metodiv modyfikuvannya ta mikrolehuvannya naplavlennoho metalu]. *The Paton Welding Journal*, (9), 2–8. <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.09.01>

- [5] Babinets, A. A., Ryabtsev, I. O. (2021). Influence of modification and microalloying on deposited metal structure and properties [Vplyv modyfikuvannya ta mikrolehuvannya na strukturu i vlastyvoli naplavlennoho metalu]. *The Paton Welding Journal*, (10), 3–10. <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.10.01>
- [6] Student, M. M., Voytovych, A. A., Sirak, Ya. Ya., et al. (2020). Development of new electrode materials, methods of restoration and protection of thin-walled parts under abrasive and gas-abrasive wear. *The Paton Welding Journal*, (10), 31–34. <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.10.06>
- [7] Kondratiev, I. A., Ryabtsev, I. O. (2014). Flux-cored wires for surfacing of steel hot mill rolls. *The Paton Welding Journal*, (6–7), 95–96. <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.06.20>
- [8] Bely, A. I., Zhudra, A. P., Dzykovich, V. I., Petrov, V. V. (2018). Electrodes for arc hardfacing of composite alloys. *The Paton Welding Journal*, (1), 29–32. <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.01.06>
- [9] Kuskov, Yu. M., Gordan, G. N., Bogajchuk, I. L., et al. (2015). Electroslag surfacing using discrete materials of different methods of manufacture. *The Paton Welding Journal*, (5–6), 30–33. <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.06.06>
- [10] Kuskov, Yu. M., Soloviov, V. G., Zhdanov, V. A. (2017). Electroslag surfacing of end faces with large-section electrode in current-supplying mould. *The Paton Welding Journal*, (11), 29–32. <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.12.05>
- [11] Kuskov, Yu. M. (2018). Influence of flux composition on the process of electroslag surfacing of end faces with discrete feeding of filler material. *The Paton Welding Journal*, (1), 33–37. <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.01.07>
- [12] Kuskov, Yu. M. (2003). A new approach to electroslag welding. *Welding Journal*, (4), 42–45.
- [13] Scott, L., Andreini, R. (2003). Electroslag process clads ship shafts. *Welding Journal*, (11), 41–42.
- [14] Dilthey, U., Woeste, K., Aretov, I. (2006). Modification of the electroslag process opens up possibilities with regard to weld surfacing. *Welding and Cutting*, (4), 215–220.
- [15] Galazzi, G., Rigdal, S., Kubenka, M. (2007). Practical application of ESAB strip cladding technology. *Svetsaren*, (1), 17–22.
- [16] Netiaga, A. V., Kuskov, Yu. M., Proskudin, V. M., et al. (2021). Formation of a high-chromium cast iron layer during electroslag surfacing in a square-section current-conducting mould. *Modern Electrometallurgy*, (4). <https://doi.org/10.37434/sem2021.04.02>
- [17] Skoblo, T., Rybalko, I., Markov, A., et al. (2021). A new way of getting the charge with diamond fraction. *Nanosistemi, nanomateriali, nanotehnologii*, 19(1), 23–33. <https://doi.org/10.15407/nnn.19.01.023>
- [18] Gadzira, M., Gnesin, G., Mykhaylyk, O., et al. (1998). Solid solution of carbon in  $\beta$ -SiC. *Materials Letters*, 35, 277–282. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(97\)00263-2](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(97)00263-2)
- [19] Tekeste, M. Z., Balvanz, L. R., Al-Aani, F., et al. (2022). Hardened edges effects on wear characteristics of cultivator sweeps using circular soil bin test. *Journal of Tribology*, 144(2), 024501. <https://doi.org/10.1115/1.4050805>
- [20] Tulaganova, L., Yunushuzhaev, S., Juraeva, G. (2022). Improving the wear resistance and durability of cultivator tools. *Journal of Physics: Conference Series*, 2373, 022026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/2/022026>
- [21] Bylonyk, O. V., Masyuta, A. S., Ryabtsev, I. O., et al. (2021). Manufacturing of a hammer part by electroslag surfacing technology. *Bulletin of the Priazov State Technical University*, 42, 14–21. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.42.2021.240566>
- [22] Goryslavets, O. V., Suslov, O. O., Ryzhkova, A. O., et al. (2022). Modeling electromagnetic processes in sectional crystallizer of electroslag surfacing. *Tekhnichna Elektrodynamika*, (4), 64. <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.064>

**Постановка проблеми.** Підвищення ресурсу деталей, що працюють у важких умовах абразивного та абразивно-корозійного зношування, є одним із ключових завдань сучасного машинобудування, зокрема в га-

лузях, пов'язаних із портовою та суднобудівною інфраструктурою. До таких об'єктів належать валопроводи, втулки, поверхні тертя, елементи днопоглиблювальної техніки, а також робочі органи механізмів, що функціо-

нують у середовищах із підвищеним вмістом піску, шламу та агресивних домішок. Для зазначених вузлів характерні високі контактні тиски, локальний нагрів у зоні тертя та інтенсивне руйнування поверхневого шару, що призводить до зниження надійності й зростання експлуатаційних витрат.

У зв'язку з цим актуальною науково-технічною проблемою є розробка та впровадження методів керованого формування зносостійких покриттів, які поєднують високу твердість, структурну стабільність і мінімальну дефектність при збереженні достатньої адгезії до основного металу. Особливого значення набуває забезпечення керованості процесів тепло- і масоперенесення під час наплавлення, оскільки саме вони визначають умови кристалізації, формування мікроструктури та ефективність засвоєння легувальних і модифікуючих компонентів покриття.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Електрошлакове наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі (ЕШН-СПК) належить до високоефективних процесів поверхневої інженерії, що забезпечують підвищені металургійні показники якості наплавленого металу. Наявність шлакової ванни виконує комплексну функцію: вона є джерелом теплової енергії, захисним середовищем, а також сприяє рафінуванню та десульфурзації металу покриття, що позитивно впливає на його структуру та експлуатаційні властивості [1, с. 82].

У низці сучасних досліджень показано перспективність застосування ЕШН із дискретною подачею присадного матеріалу, а також встановлено суттєвий вплив складу флюсу на теплові процеси, стабільність температурного поля та умови формування наплавленого шару [9, с. 30–33; 11, с. 33–37]. Разом із тим більшість робіт зосереджена переважно на технологічних аспектах процесу або на загальній оцінці властивостей покриттів без глибокого аналізу взаємозв'язку між тепловими умовами у шлаковій ванні, механізмами масоперенесення та процесами структуроутворення.

Особливої уваги потребують питання цілеспрямованого модифікування напла-

вленого металу дисперсними домішками, які вводяться через порошкові драти. Наявні публікації свідчать про потенційну ефективність такого підходу, однак відсутня систематизація закономірностей, що пов'язують властивості дисперсної фази, параметри тепло- і масоперенесення в кристалізаторі та результуючу зносостійкість покриттів. Це зумовлює необхідність комплексного дослідження зазначених процесів і формування науково обґрунтованих підходів до керування структурою та властивостями зносостійких покриттів при електрошлаковому наплавленні [12, с. 42].

**Мета та завдання дослідження.** Метою роботи є встановлення закономірностей формування зносостійких покриттів при ЕШН-СПК з введенням дисперсних модифікуючих домішок, а також обґрунтування впливу дисперсної фази на структуроутворення і експлуатаційні характеристики наплавленого металу.

Для досягнення мети розв'язано такі завдання: (1) узагальнено металургійні та теплові особливості процесу ЕШН-СПК; (2) проаналізовано принципи введення дисперсних домішок через порошкові драти та їх функції в шлаковій ванні; (3) встановлено зв'язок «дисперсність/хімічна природа домішки – мікроструктура – твердість – зносостійкість»; (4) виконано валідацію закономірностей за лабораторними та польовими випробуваннями.

**Методи, об'єкт та предмет дослідження.** Об'єктом дослідження є процес формування зносостійких покриттів при електрошлаковому наплавленні у струмопідвідному кристалізаторі.

**Предметом дослідження** є закономірності тепло- і масоперенесення у шлаковій ванні та їх вплив на структуроутворення і зносостійкість наплавлених покриттів, модифікованих дисперсними домішками.

Дослідження виконано з використанням технології електрошлакового наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі, в якому кристалізатор одночасно виконує функції формоутворення наплавленого шару та підводу електричного струму до шлакової ванни. Реалізація процесу передбачає фор-

мування зони взаємодії «поверхня наплавлення – охолоджувач», що істотно впливає на інтенсивність теплопроводу, час перебування металу у перегрітому стані та завершення процесів кристалізації і структурних перетворень [2, с. 84].

Як флюс використовували АНФ-29, склад якого забезпечує необхідні електропровідність, в'язкість і рафінуючу здатність шлакової ванни ( $\text{CaF}_2$  60–70%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  30–40%;  $\text{SiO}_2 \leq 8\%$ ;  $\text{S} \leq 0,5\%$ ) [3, с. 50]. Типові режими електрошлакового наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі реалізовували на постійному струмі зворотної полярності при напрузі 20–30 В та значеннях струму в діапазоні 90–130 А залежно від геометрії виробу та умов теплопроводу [4, с. 50].

Дисперсні модифікуючі домішки вводили до зони наплавлення через порошкові драти різного складу. Застосовували карбідні ( $\text{NbC}$ ), оксидні ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ) та вуглецевмісні (графіт, алмазна фракція) добавки, які забезпечують різні механізми зміцнення наплавленого металу. Оцінювання твердості здійснювали за шкалою HRC, міцність на розрив визначали на стандартних зразках відповідно до чинних методик. Зносостійкість покриттів оцінювали шляхом лабораторних випробувань на абразивний знос, а також за результатами польових випробувань на лемішах плугів і стрілочастих лапах культиваторів у різних ґрунтових умовах експлуатації [5, с. 166–173].

**Основний матеріал.** Шлакова ванна в процесах електрошлакового наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі (ЕШН-СПК) є ключовим функціональним середовищем, у якому одночасно реалізуються: (I) генерація теплоти (переважно нагріванням електропровідного шлаку), (II) формування температурного поля в межах «шлакова ванна – металева ванна – кристалізатор», (III) масоперенесення (перемішування, дифузія, розчинення/диспергування домішок), (IV) металургійна взаємодія та (V) кристалізація й формування шару. Внаслідок цього, закономірності тепло- та масоперенесення безпосередньо визначають: глибину проплавлення основи, стабільність утворення металевої ванни, ступінь засво-

ення легувальних і дисперсних компонентів та, у підсумку, щільність, бездефектність і зносостійкість наплавленого покриття [6, с. 54–57; 7, с. 75–77].

Фізична сутність теплового режиму ЕШН-СПК полягає у тому, що шлак працює як резистивний (омічний) нагрівач, а сумарна підведена електрична потужність перетворюється в теплоту, яка витрачається на:

- нагрівання та плавлення присадного металу;
- нагрівання та часткове плавлення поверхні основи (проплавлення);
- нагрівання модифікуючих домішок, їх змочування, часткове/повне розчинення чи диспергування;
- тепловтрати через водоохолоджувальний кристалізатор і навколишні конструктивні елементи.

Експериментально зафіксовані діапазони режимів живлення (струм/напруга) свідчать, що процес ведеться в області, де можливо забезпечити стійке тепловиділення без надмірного перегрівання шлакової ванни: струм через кристалізатор 110–130 А, струм графітового електрода 90–110 А, напруга між секціями кристалізатора 20–25 В, напруга між електродом і кристалізатором 25–30 В.

Навіть проста оцінка за формулою  $P \approx I \cdot U$  показує, що сумарна електрична потужність процесу перебуває орієнтовно в межах  $\approx 4,45\text{--}6,55$  кВт (за наведеними інтервалами струмів і напруг), що підтверджує можливість керованого утримання ванни в робочому тепловому стані саме за рахунок електричних параметрів [8, с. 32–34].

При цьому центральною закономірністю є існування оптимального співвідношення між:

- питомим тепловиділенням у шлаку (визначається електропровідністю шлаку, геометрією струмового контуру, рівнем струму/напруги), та
- теплопроводом через водоохолоджувальний кристалізатор і формуючі елементи.

Занадто інтенсивний тепловідвід підвищує швидкість кристалізації (що сприяє дрібнозернистості), але водночас може спричинити неповне плавлення/недостатню металургійну взаємодію присадних і модифікуючих компонентів. І навпаки, надмірна потужність (пере-

грів ванни) збільшує ризики: розширення зони проплавлення, локальні перегріви, зростання розчинення модифікаторів та підвищення дефектності (пористість/непровар як наслідок втрати керованості ванни). Зокрема, показано, що локальне перегрівання приелектродної зони призводить до нерівномірного розподілу температури у шлаковій ванні та різної величини проплавлення основного металу; для «утримання» збільшеного об'єму розплаву в перегрітому стані необхідне істотне збільшення потужності індуктора, що підвищує енерговитратність.

Отже, технологічно правильним є ведення процесу в режимі, коли теплоти достатньо для:

- гарантованого плавлення присадного металу,
- стабільного існування металевої ванни,
- процесів розчинення та диспергування домішок без переходу в режим надмірного теплового навантаження, який призводить до дестабілізації температурного поля та погіршення відтворюваності результатів.

У ЕШН-СПК кристалізатор виконує подвійну функцію: (I) струмопідвід, (II) інтенсивний теплообмінник, що формує великий температурний градієнт у зоні кристалізації. В дослідженнях використано водоохолоджуваний циліндричний кристалізатор (валок-кристалізатор), який одночасно забезпечує формування шару і контрольований тепловідвід [9, с. 29–32].

З інженерної точки зору важливий не лише абсолютний рівень температури, а й однорідність температурного поля у ванні. Показано, що відомі конструктивні рішення (панельний трисекційний кристалізатор з розширеною струмопідвідною верхньою секцією) за рахунок двох струмопідводів до верхньої секції забезпечують більш рівномірний розподіл температурного поля у шлаковій ванні, що є критично важливим саме для стабільності проплавлення і товщини шару [10, с. 33–37].

Натомість при неусунених локальних перегрівах виникає температурна неоднорідність, яка транслюється в неоднорідність проплавлення і, як наслідок, – у несталість геометрії та властивостей покриття.

Для підвищення керованості та технологічної “толерантності” процесу застосовується додатковий індукційний підігрів рідкої ванни розплавленого металу вихровими струмами. В результаті дослідження чітко зафіксовано механізм дії: додатковий тепловий вплив збільшує час перебування металу в перегрітому стані, що забезпечує збереження достатньої рідинної плинності до надходження металу в зазор між поверхнею, що наплавляється, і охолоджувачем, де стартує кристалізація і формується шар необхідної товщини та глибини проплавлення.

Разом з тим, індукційний підігрів не є «безумовним благом»: при локальному перегріванні приелектродного об'єму шлаку виникає температурна нерівномірність, а спроба компенсувати її збільшенням об'єму перегрітого розплаву призводить до необхідності суттєвого підвищення потужності індуктора та росту енерговитрат [11, с. 3–7].

Звідси практична закономірність керування: індуктор доцільно використовувати як інструмент тонкого налаштування (стабілізації плинності та завершення металургійних процесів), але не як спосіб «перегріти ванну», що неминуче погіршує однорідність температурного поля.

Масоперенесення в системі «шлакова ванна – металева ванна» визначається сумарною дією:

- конвективного перемішування (термоконвекція, електромагнітні сили струмового контуру, гідродинаміка подачі присадки);
- молекулярної дифузії компонентів у розплавах;
- міжфазних явищ (змочування, розчинення, реакції на межі “шлак–метал”);
- траєкторії введення домішок і їх дисперсності.

Критичний момент саме для дисперсних модифікуючих домішок – час і умови їх перебування у високотемпературній зоні до моменту захоплення фронтом кристалізації. Результат дослідження фіксує конструктивно-технологічне рішення: присадний матеріал (зокрема стрічка) подається через отвір діаметром 15 мм у графітовому електроді; плавлення відбувається у шлаковій ванні.

Це означає, що вхідний потік матеріалу формує локальну зону підвищених темпе-

ратур та інтенсивного масообміну; якщо режим підібраний правильно, у ванні встигають завершитися процеси:

- теплового вирівнювання,
- диспергування/часткового розчинення домішок,
- переносу продуктів реакцій у металеву ванну.

Важливий технологічний висновок: процеси з надмірно перегрітим металевим розплавом можуть ускладнювати саме армування (збереження дисперсної фази) через значне розчинення модифікуючих компонентів; для ЕШН рідким присадним матеріалом зазначено, що температура перегрітого металевого розплаву може сягати  $\sim 1700$  °C, що є фактором інтенсифікації розчинення модифікаторів.

Звідси закономірність: для формування зносостійких покриттів із дисперсним зміцненням тепловий режим має бути достатнім для металургійної взаємодії, але обмеженим настільки, щоб не «спалити» дисперсну складову розчиненням у перегрітому металі.

Застосовано флюс АНФ-29 зі складом (мас. %):  $\text{CaF}_2$  60–70;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  30–40;  $\text{SiO}_2 \leq 2$ ;  $\text{S} \leq 0,06$ , що прямо вказує на орієнтацію на високу електропровідність і технологічну текучість шлаку.

Функціональна роль ключових компонентів розкрита наступним чином:

- $\text{CaF}_2$  підвищує електропровідність і знижує в'язкість, що зменшує зону локаль-

ного перегріву та підтримує стабільність шлакової ванни;

- $\text{Al}_2\text{O}_3$  сприяє формуванню більш дрібної мікроструктури (за рахунок збільшення в'язкості шлаку і впливу на кристалізацію), знижує пористість і покращує властивості шару;

- надлишковий  $\text{SiO}_2$  зменшує електропровідність, що може викликати нестійкість процесу і дефекти, тому його вміст обмежено.

Таким чином, склад флюсу є не «допоміжним», а керуючим параметром тепло- і масоперенесення: через електропровідність шлаку визначається інтенсивність омичного тепловиділення, через в'язкість – інтенсивність конвективного перемішування та транспорту дисперсних домішок, а через реакційну здатність – характер взаємодії на межі «шлак–метал» і ймовірність утворення неметалевих включень [12, с. 21–24; 13, с. 43–47].

Температура шлакової ванни є інтегральним параметром, який відображає баланс «тепловиділення–тепловідвід» і фактично визначає швидкість кристалізації та формування структури. Також додатково наведено експериментальний зв'язок властивостей покриття з температурою шлакової ванни: показано залежності твердості (рис. 1) та зносостійкості (рис. 2) від температури, на основі чого обґрунтовано раціональну температуру ведення процесу.

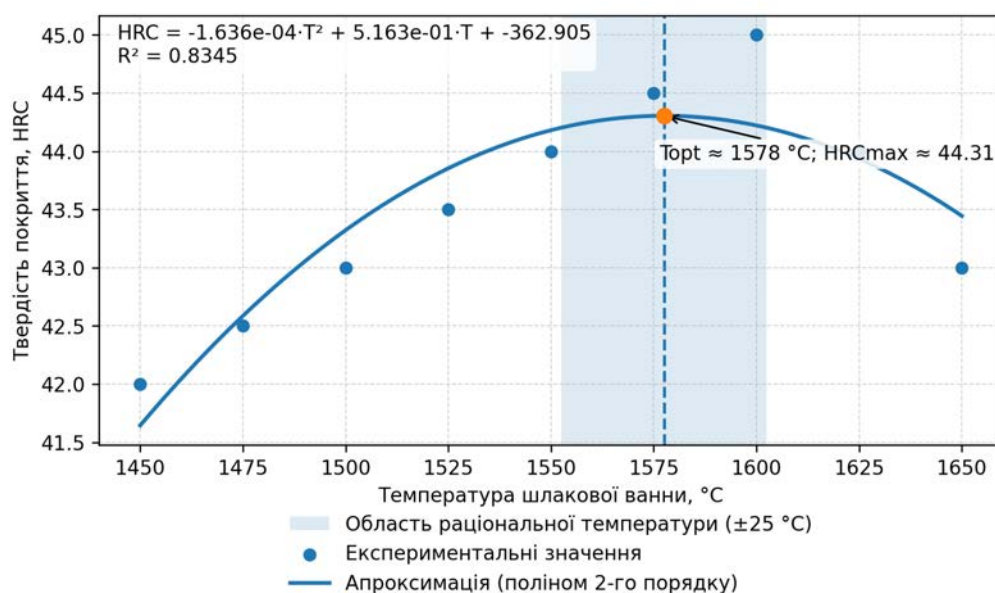


**Рис. 1.** Залежність твердості наплавленого покриття (HRC) від температури шлакової ванни. Точки – експериментальні дані; суцільна лінія – апроксимація (поліном 2-го порядку); пунктирна лінія –  $T_{opt}$ ; заштрихована зона –  $T_{opt} \pm 25$  °C; наведено рівняння регресії та  $R^2$

Це напряму підсилює тезу про наявність раціонального показника: низька температура – ризик неповного плавлення/недостатньої взаємодії; висока – зростання розчинення дисперсних домішок і погіршення керованості фронту кристалізації.

Узагальнені електричні та технологічні параметри, що визначають інтенсивність тепловиділення і характер масоперенесення в процесі електрошлакового наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі, наведено в табл. 1. Аналіз наведених даних свідчить, що саме співвідношення струмів і напруг у зоні кристалізатора та приелектродній області формує тепловий баланс шлакової ванни й визначає стабільність температурного поля. Значення струму через кристалізатор у межах 110–130 А разом із напругою 20–25 В забезпечують достатній рівень нагрівання ідтримання металургійно активної ванни, тоді як параметри електрода (90–110 А; 25–30 В) визначають локальні умови плавлення присадного матеріалу та диспергування модифікуючих домішок. Водночас конструкція водоохолоджуваного кристалізатора виступає ключовим фактором керованого тепловідводу, що дозволяє обмежити перегрів металеві ванни та забезпечити завершення процесів масоперенесення без втрати дисперсної складової. Таким чи-

ном, параметри, наведені в табл. 1, відображають існування технологічно обґрунтованого компромісу між інтенсивністю тепловиділення та тепловідводом, при якому досягається стабільне формування щільного, бездефектного наплавленого шару з прогнозованими структурними та експлуатаційними властивостями.

Функціональну роль основних компонентів флюсу АНФ-29 у формуванні температурного поля та умов масоперенесення під час електрошлакового наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі узагальнено в табл. 2. Аналіз наведених характеристик свідчить, що склад флюсу є одним із визначальних чинників керування тепловим режимом шлакової ванни та стабільністю металургійних процесів. Зокрема, переважний вміст  $\text{CaF}_2$  забезпечує високу електропровідність і текучість шлаку, що сприяє рівномірному нагріванню та зменшенню температурних градієнтів у ванні.

Присутність  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , у свою чергу, підвищує в'язкість шлаку й стабілізує фронт кристалізації, створюючи сприятливі умови для формування дрібнозернистої структури наплавленого шару. Обмежений вміст  $\text{SiO}_2$  запобігає зниженню електропровідності та втраті керованості процесу, тоді як нормування вмісту сірки мінімізує ризик погір-

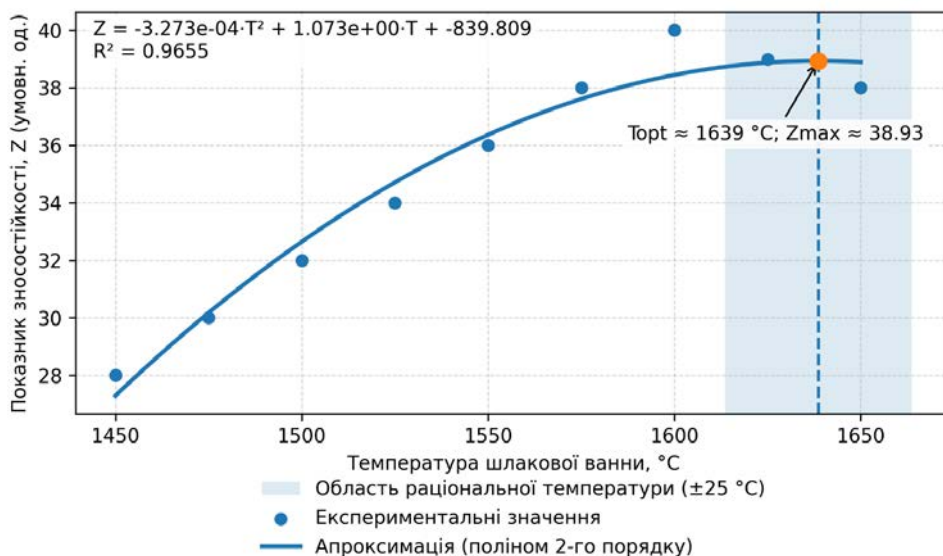


**Рис. 2.** Залежність показника зносостійкості наплавленого покриття  $Z$  (умовн. од.) від температури шлакової ванни. Точки – експериментальні дані; суцільна лінія – апроксимація (поліном 2-го порядку); пунктирна лінія –  $T_{\text{opt}}$ ; заштрихована зона –  $T_{\text{opt}} \pm 25^{\circ}\text{C}$ ; наведено рівняння регресії та  $R^2$

шення металургійної якості покриття. Таким чином, дані табл. 2 підтверджують, що флюс АНФ-29 виконує не лише захисну, а й активну регулюючу функцію, визначаючи інтенсивність тепловиділення, характер масоперенесення та, в кінцевому підсумку, стабільність структури і експлуатаційні властивості зносостійких покриттів.

Узагальнені ключові закономірності керування тепло- та масоперенесенням у процесі електрошлакового наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі та їх типові технологічні наслідки наведено в табл. 3. Аналіз представлених положень свідчить, що стабільність формування наплавленого шару визначається сукупною дією теплових, електричних і конструктивних факторів, які впливають на однорідність температурного поля та інтенсивність масообміну в шлаковій ванні. Показано, що локальні

перегріву або нерівномірний розподіл температури неминуче призводять до варіації глибини проплавлення, несталості геометрії шару та розкиду механічних властивостей [14, с. 12–17]. Водночас застосування конструктивно оптимізованих схем струмопідводу і керованого індукційного підігріву дозволяє стабілізувати тепловий режим, збільшити час перебування металу у перегрітому стані та забезпечити завершення процесів розчинення і диспергування модифікуючих домішок. Узагальнені в табл. 3 закономірності демонструють, що саме узгодження інтенсивності тепловиділення у шлаковій ванні з можливостями теплопідводу через кристалізатор є визначальною умовою формування щільних, структурно однорідних і зносостійких покриттів із прогнозованими експлуатаційними характеристиками.

**Таблиця 1.** Електричні та технологічні параметри, що визначають тепловиділення і масоперенесення в ЕШН-СПК

| Параметр                                 | Позначення / одиниці | Діапазон / значення                                                | Вплив на тепло- та масоперенесення                                                         |
|------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Струм через кристалізатор                | $I_{кр}$ , А         | 110–130                                                            | Визначає інтенсивність нагрівання шлаку в зоні струмопідводу і стабільність теплового поля |
| Струм графітового електрода              | $I_{эл}$ , А         | 90–110                                                             | Формує тепловий режим приелектродної зони (критично для плавлення/диспергування домішок)   |
| Напруга між секціями кристалізатора      | $U_{кр}$ , В         | 20–25                                                              | Разом із $I_{кр}$ визначає потужність підведення теплоти в шлак                            |
| Напруга між електродом і кристалізатором | $U_{эл}$ , В         | 25–30                                                              | Впливає на рівень перегріву у приелектродній зоні та глибину проплавлення                  |
| Спосіб подачі присадки                   | –                    | Через отвір Ø15 мм у графітовому електроді                         | Задає гідродинаміку вводу матеріалу та локальні умови масообміну у ванні                   |
| Тип формуючого елемента                  | –                    | Водоохолоджуваний циліндричний кристалізатор (валок-кристалізатор) | Забезпечує інтенсивний тепловідвід і контроль швидкості кристалізації                      |
| Флюс (основа теплового режиму шлаку)     | –                    | АНФ-29                                                             | Забезпечує високу електропровідність/керованість ванни та стабільність процесу             |

**Таблиця 2.** Функціональна роль компонентів флюсу АНФ-29 у формуванні температурного поля та умов масоперенесення

| Компонент                      | Вміст (мас. %) | Теплофізична/електрофізична роль у шлаковій ванні      | Технологічний ефект для покриття                                                           |
|--------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| CaF <sub>2</sub>               | 60–70          | Підвищує електропровідність, підтримує текучість шлаку | Стабільніший нагрів і рівномірніше теплове поле; зменшення ризику локальних перегрівів     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 30–40          | Підвищує в'язкість, впливає на кристалізацію           | Сприяє дрібнозернистості, зменшенню пористості та покращенню механічних характеристик шару |
| SiO <sub>2</sub>               | ≤2             | Надлишок зменшує електропровідність (небажано)         | Обмеження SiO <sub>2</sub> знижує ризик нестійкості процесу та дефектів                    |
| S                              | ≤0,06          | Нормується для мінімізації негативного впливу          | Стабільність металургійних властивостей наплавленого металу                                |

Таблиця 3. Ключові закономірності керування тепло- та масоперенесенням і типові технологічні наслідки

| Закономірність / керуючий фактор                                                | Емпіричне/конструктивне підтвердження                                                                                   | Практичний наслідок для якості шару                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Важлива однорідність температурного поля у ванні                                | Локальний перегрів → нерівномірний розподіл температури і різна величина проплавлення                                   | Нестабільна геометрія покриття та розкид властивостей                                 |
| Індуктор збільшує час перегріву металу і підтримує плинність                    | Додатковий підігрів вихровими струмами → збільшення часу в перегрітому стані і збереження плинності до кристалізації    | Менший ризик непровару/пористості при коректному налаштуванні режиму                  |
| Надмірне «розширення» перегрітої зони енергетично не вигідне                    | Для утримання більшого об'єму перегрітої ванни потрібне значне збільшення потужності індуктора                          | Зростання енерговитрат, погіршення керованості та температурної однорідності          |
| Конструкція струмопідводу впливає на теплове поле                               | Два струмопідводи до верхньої секції → рівномірніше температурне поле                                                   | Стабільніша товщина шару і повторюваність результатів                                 |
| Перегрів підсилює розчинення модифікаторів (ризик втрати дисперсного зміцнення) | Для ЕШН рідким металом зазначена складність армування через значне розчинення домішок у перегрітому розплаві (~1700 °C) | Потрібен температурний «компроміс» для збереження дисперсної складової                |
| Температура ванни корелює з твердістю/зносостійкістю                            | Залежності твердості (рис. 1) і зносостійкості (рис. 2) від температури шлакової ванни                                  | Обґрунтування раціональної температури процесу як інструменту керування властивостями |

Таким чином, результати досліджень, підтверджують, що формування зносостійких покриттів при електрошлаковому наплавленні у струмопідвідному кристалізаторі має закономірний характер і визначається узгодженою дією теплового режиму шлакової ванни, умов масоперенесення та складу модифікуючих компонентів. Керування інтенсивністю тепловиділення, тепловідводом через кристалізатор і процесами диспергування домішок дозволяє цілеспрямовано формувати щільну, структурно однорідну мікроструктуру наплавленого шару, що забезпечує підвищену зносостійкість і стабільні експлуатаційні властивості деталей.

#### Обговорення отриманих результатів.

Отримані результати дозволяють сформулювати узагальнену модель формування властивостей покриття при ЕШН-СПК. Перший рівень закономірностей визначається металургією шлакової ванни (рафінування, десульфуріяція, стабілізація складу) [15, с. 82]. Другий рівень – тепловими умовами у кристалізаторі, що впливають на швидкість кристалізації та ступінь розчинення/диспергування модифікаторів [16, с. 84]. Третій рівень – властивостями дисперсної фази, яка забезпечує модифікування та мікролегування. Тільки при узгодженні трьох рівнів досягається одночасно висока твердість, структурна рівномірність і підвищена зносостійкість.

Практична релевантність таких закономірностей для морської інфраструктури підтверджується застосуванням електрошлакових процесів для наплавлення валів суднових установок [17, с. 41–42] та для відновлення/зміцнення великогабаритних деталей типу валів і торців [18, с. 29–32]. Введення дисперсних модифікаторів через порошкові дроти дає інструмент адаптації структури до конкретного типу зношування (абразивного, гідроабразивного, корозійно-ерозійного).

#### Наукова новизна

1) Сформульовано та експериментально підтверджено закономірності структуроутворення покриттів при ЕШН-СПК за умов введення дисперсних карбідних, оксидних та вуглецевмісних модифікаторів через порошкові дроти з урахуванням взаємодії «шлакова ванна – тепловідвід – дисперсна фаза» [19, с. 2–3].

2) Встановлено, що кероване тепловиділення у кристалізаторі (зокрема за рахунок індукційної дії) підвищує стабільність формування шару та забезпечує завершення процесів розчинення/диспергування домішок, що зменшує дефектність покриття [20, с. 43, 21, с. 90–92].

3) Обґрунтовано функціональні ролі дисперсних домішок: NbC – карбідне зміцнення і мікролегування; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> – модифікування і термостабілізація; графіт/алмаз –

вуглецювання та зниження коефіцієнта тертя у парі тертя.

**Практична значущість.** Запропоновані закономірності дозволяють проектувати склади порошкових дротів і режими ЕШН-СПК під задані умови зношування та геометрію виробу. Практичні випробування демонструють підвищення зносостійкості на 44% та зростання ресурсу деталей до 40% (леміші – до 73 га, лапи культиватора – до 35 га) порівняно із серійними аналогами [22, с. 1–2], що є перспективним для застосування в ремонтно-відновлювальних операціях для сільськогосподарського ремонтного виробництва.

#### Висновки

1) Визначено ключові закономірності формування зносостійких покриттів при

ЕШН-СПК: металургійне рафінування у шлаковій ванні, керований тепловідвід через кристалізатор та модифікуюча/зміцнювальна дія дисперсних домішок.

2) Показано, що введення NbC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> та вуглецевмісних компонентів через порошкові дроти забезпечує подібнення структури, підвищення частки твердих фаз і стабільність властивостей при термоциклуванні.

3) Підтверджено експлуатаційний ефект: твердість 58–62 HRC, σ<sub>в</sub> 700–900 МПа і збільшення зносостійкості до 44%, що робить ЕШН-СПК з дисперсними модифікаторами ефективним інструментом підвищення ресурсу деталей у абразивно-корозійних середовищах.

#### Список літератури

- [1] Захаров, А. В. (2025). Застосування модифікуючих присадок та їх введення у відновлювальні покриття для підвищення експлуатаційної стійкості : дисертація доктора філософії за спеціальністю 132 «Матеріалознавство». Харків. 276 с.
- [2] Рибалко, І. М., Тіхонов, О. В., Захаров, А. В. (2024). Підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин електрошлаковим наплавленням у струмопідвідному кристалізаторі. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*, 6(149), 166–173. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.6.20>
- [3] Бабінець, А., Рябцев, І. (2021). Вплив модифікування та мікролегування на структуру і властивості наплавленого металу. *The Paton Welding Journal*. № 10. С. 3–10. URL: <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.10.01>
- [4] Бабінець, А. А., Рябцев, І. О. (2021). Класифікація методів модифікування та мікролегування наплавленого металу (огляд). *Автоматичне зварювання*, 9, 2–8. <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.09.01>
- [5] Бабінець, А. А., Рябцев, І. О. (2021). Вплив модифікування та мікролегування на структуру і властивості наплавленого металу (огляд). *Автоматичне зварювання*, 10, 3–10. <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.10.01>
- [6] Студент, М. М., Войтович, А. А., Сірак, Я. Я. та ін. (2020). Розробка нових електродних матеріалів, методів відновлення та захисту тонкостінних деталей при абразивному та газоабразивному зношуванні. *Автоматичне зварювання*, 10, 31–34. <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.10.06>
- [7] Кондратьєв, І. А., Рябцев, І. О. (2014). Порошкові дроти для наплавлення валків гарячої прокатки. *Автоматичне зварювання*, 6–7, 95–96. <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.06.20>
- [8] Белий, А. І., Жудра, А. П., Дзикович, В. І., Петров, В. В. (2018). Електроди для дугового наплавлення композиційних сплавів. *Автоматичне зварювання*, 1, 29–32. <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.01.06>
- [9] Кусков, Ю. М., Гордан, Г. Н., Богайчук, І. Л. та ін. (2015). Електрошлакове наплавлення з використанням дискретних матеріалів різних способів виготовлення. *Автоматичне зварювання*, 5–6, 30–33. <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.06.06>
- [10] Кусков, Ю. М., Соловійов, В. Г., Жданов, В. А. (2017). Електрошлакове наплавлення торців електродом великого перерізу у струмопідвідному кристалізаторі. *Автоматичне зварювання*, 11, 29–32. <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.12.05>
- [11] Кусков, Ю. М. (2018). Вплив складу флюсу на процес електрошлакового наплавлення торців при дискретній подачі присадного матеріалу. *Автоматичне зварювання*, 1, 33–37. <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.01.07>

- [12] Кусков, Ю. М. (2003). Новий підхід до електрошлакового зварювання. *Welding Journal*, 4, 42–45.
- [13] Скотт, Л., Андрейні, Р. (2003). Застосування електрошлакового процесу для наплавлення суднових валів. *Welding Journal*, 11, 41–42.
- [14] Ділтей, У., Весте, К., Аретов, І. (2006). Модифікація електрошлакового процесу як шлях розширення можливостей наплавлення. *Welding and Cutting*, 4, 215–220.
- [15] Галацці, Г., Рігдаль, С., Кубенка, М. (2007). Практичне застосування технології стрічкового наплавлення ESAB. *Svetsaren*, 1, 17–22.
- [16] Нетяга, А. В., Кусков, Ю. М., Проскудін, В. М. та ін. (2021). Формування шару високохромистого чавуну при електрошлаковому наплавленні у струмопідвідному кристалізаторі квадратного перерізу. *Сучасна електрометалургія*, 4. <https://doi.org/10.37434/sem2021.04.02>
- [17] Скобло, Т. С., Рибалко, І. М., Марков, А. В. та ін. (2021). Новий спосіб отримання шихти з алмазною фракцією. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, 19(1), 23–33. <https://doi.org/10.15407/nnn.19.01.023>
- [18] Гадзіра, М., Гнесін, Г., Михайлик, О. та ін. (1998). Твердий розчин вуглецю в  $\beta$ -SiC. *Materials Letters*, 35, 277–282. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(97\)00263-2](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(97)00263-2)
- [19] Текесте, М. З., Балванц, Л. Р., Аль-Аані, Ф. та ін. (2022). Вплив зміцнених крайок на зносостійкість лап культиваторів за результатами випробувань у ґрунтовому каналі. *Journal of Tribology*, 144(2), 024501. <https://doi.org/10.1115/1.4050805>
- [20] Тулаганова, Л., Юнушужаєв, С., Жураєва, Г. (2022). Підвищення зносостійкості та довговічності робочих органів культиваторів. *Journal of Physics: Conference Series*, 2373, 022026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/2/022026>
- [21] Білони́к, О. В., Масюта, А. С., Рябцев, І. О. та ін. (2021). Виготовлення деталі типу «молоток» за технологією електрошлакового наплавлення. *Вісник Приазовського державного технічного університету*, 42, 14–21. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.42.2021.240566>
- [22] Гориславець, О. В., Суслов, О. О., Рижкова, А. О. та ін. (2022). Моделювання електромагнітних процесів у секційному кристалізаторі електрошлакового наплавлення. *Технічна електродинаміка*, 4, 64. <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.064>

---

© Andriy V. Zakharov, Ivan M. Rybalko, Oleksandr V. Tihonov, Oleksandr V. Saychuk

Дата першого надходження статті до видання: 27.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 15.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0