

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ОХОЛОДЖЕННЯ МЕТАЛЕВОЇ ВАННИ ПРИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОМУ ПЕРЕПЛАВІ

І.В. Протоковілов, В.Б. Порохонько, Д.А. Петров

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11

РЕФЕРАТ

Наведено результати експериментальних досліджень динаміки зміни температури і глибини рідкої металевої ванни при електрошлаковому переплаві в умовах зменшення або відключення електричної напруги на ванні. Дослідження проводили при виплавці зливків вуглецевої сталі в мідних водоохолоджуваних кристалізаторах діаметром 85, 125 і 220 мм. Були встановлені залежності глибини і температури ванни від часу охолодження для різних діаметрів зливків і різних режимів їх охолодження. Шляхом виготовлення поздовжніх темплетів були визначені профілі металевої ванни для зливків вказаних діаметрів. Отримані експериментальні дані можуть бути використані при верифікації результатів математичного моделювання і розробленні режимів електрошлакового переплаву сталей і сплавів. Бібліогр. 9, рис. 7.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: електрошлаковий переплав, металева ванна, температура, глибина

ВСТУП

Електрошлаковий переплав (ЕШП) є ефективним способом отримання високоякісних зливків з різних металів та сплавів [1, 2]. Однак зі збільшенням розмірів зливка і ступеня легування сплаву отримання бездефектних зливків з щільною однорідною структурою і рівномірним розподілом хімічних елементів стає дедалі більш складним завданням [3–5]. Вирішальним чинником, який зумовлює вказані складнощі, є зменшення інтенсивності тепловідведення, що в свою чергу, призводить до збільшення об'єму рідкої металевої ванни, яка є джерелом дефектів усадкового та ліквацийного походження. Це суттєво обмежує можливості ЕШП з виплавки зливків складнолегованих сталей та сплавів.

У зв'язку з цим проводяться дослідження спрямовані на розроблення технічних засобів і прийомів задля зменшення в процесі ЕШП об'єму рідкої металевої ванни і пригнічення усадкових та ліквацийних процесів [6, 7]. Одним з таких методів впливу на структуроутворення металу є ведення процесу ЕШП в імпульсному режимі з пошаровим формуванням зливка [8, 9]. Ключовими параметрами пошарового формування є об'єм окремих порцій (шарів) наплавленого металу та тривалість пауз плавлення, під час яких відбувається їх кристалізація. Визначення цих параметрів має ґрунтуватися на об'єктивних даних щодо динамічних характеристик теплових параметрів металевої ванни в процесі ЕШП зливків відповідних розмірів.

Таким чином, практичний інтерес представляє дослідження динаміки зміни температури і глибини

рідкої металевої ванни в процесі ЕШП при різних режимах її охолодження, що було метою цієї роботи.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Динаміку зміни температури і глибини металевої ванни досліджували експериментальним шляхом при ЕШП зливків діаметром 85, 125 і 220 мм з вуглецевої сталі під флюсом АНФ-1 ($\text{CaF}_2 > 90\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 < 3\%$, $\text{CaO} < 5\%$, $\text{SiO}_2 < 2,5\%$). Використовували вуглецеву сталь з огляду на те, що отримані результати можна екстраполювати і на інші матеріали, враховуючи відповідні коефіцієнти температуропровідності конкретних матеріалів.

Експерименти проводили наступним чином. Після виплавки зливка висотою не менше ніж $1,5 \times d_{\text{зп}}$ відключали електричну напругу на ванні і витратний електрод виводили з шлакової ванни (піднімали вгору, щоб був вільний доступ до поверхні ванни). Водночас, в металеву ванну занурювали гребінку з вольфрам-ренієвих термопар ВР 5/20 у захисних чохлах з карбонітриду бору ВНС (рис. 1). Сигнали з термопар через перетворювач з гальванічною ізоляцією PSA-01 подавали на АЦП і далі на персональний комп'ютер.

Глибину металевої ванни визначали шляхом періодичного занурення у розплав вольфрамових стрижнів до їх контакту з дном металевої ванни. Такий спосіб дозволяв визначити глибину металевої ванни разом з двофазною зоною.

В інших експериментах напругу на ванні не відключали, а зменшували до певного рівня (5 і 10 В), при якому плавлення електрода припинялося. Подачу електрода у шлакову ванну при цьому припиняли. Це робилося для визначення впливу

Авторське право © Автор(и)

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026

Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

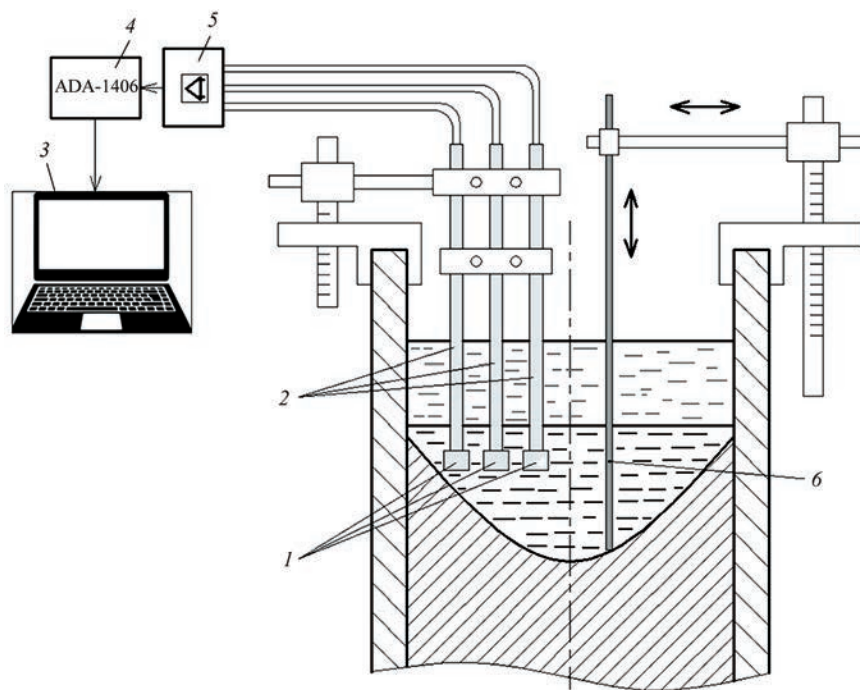


Рис. 1. Схема вимірювання температури і глибини металевої ванни: 1 — захисні чохла з карбонітриду бору; 2 — термопари в алуновій трубці; 3 — комп'ютер; 4 — аналого-цифровий перетворювач; 5 — перетворювач з гальванічною ізоляцією; 6 — вольфрамовий стрижень

підігріву шлакової ванни на динаміку зміни температури рідкої металевої ванни. В експериментах використовували витратні електроди змінного перерізу, які забезпечували вільний доступ до поверхні шлакової ванни без їх видалення з ванни. В цих експериментах, для усунення впливу електричної напруги на ванні на величину електрорушійної сили термопар, напругу періодично відключали на короткий термін (до 1 с) і саме в ці періоди фіксували значення температури.

Крім описаних вище досліджень також проводили експерименти з визначення профілю металевої ванни при ЕШП зливків діаметром 85, 125 і 220 мм. В цьому випадку, після виплавки зливка висотою $1,5 \times d_{\text{зл}}$, відключали напругу і на поверхню шлакової ванни подавали мідну крупку. Отри-

мані зливки різали вздовж осі, виготовляли поздовжні темплети, які травили в розчині 10 % HF + 25 % HNO₃ + 65 % H₂O. Це дозволяло проявляти форму металевої ванни (фронт кристалізації).

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Результати експериментальних досліджень представлені на рис. 2–7. На рис. 2 наведені графіки зміни глибини металевої ванни для зливків різних діаметрів після відключення напруги. Отримані дані свідчать, що термін повного твердіння металевої ванни при ЕШП зливків діаметром 85 мм складає біля 4 хв, діаметром 125 мм — 9 хв і діаметром 220 мм — 30...35 хв. При цьому, в перші періоди після відключення напруги твердіння ванни відбувається більш інтенсивно, ніж в заключні. Це пов'язане з умовами відведення тепла в стінку кристалізатора, коли в процесі твердіння ванни зменшується площа її контакту з водоохолоджуваною поверхнею кристалізатора, та утворюється зазор між стінкою кристалізатора і зливком. Так тривалість твердіння 50 % об'єму металевої ванни зливків вказаних діаметрів складає 1,8, 2,5 і 8 хв, а 70 % об'єму ванни — 2,6, 5,0 і 16 хв відповідно.

Вплив підігріву рідкого металу шляхом неповного відключення напруги на електроді на динаміку зміни глибини металевої ванни наведено на рис. 3. Отримані результати вказують про те, що у порівнянні з повним відключенням електричної напруги, підтримання напруги на електроді вели-

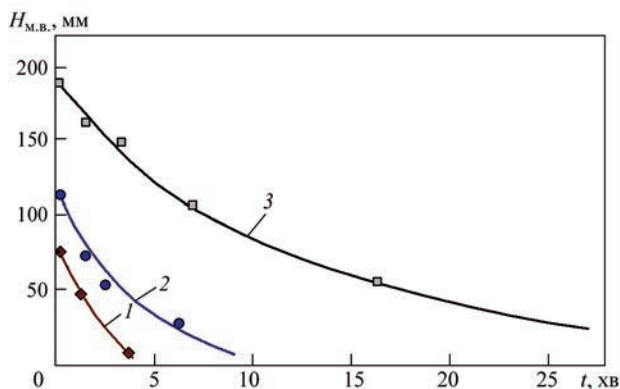


Рис. 2. Динаміка зміни глибини металевої ванни після відключення напруги при ЕШП зливків діаметром 85 мм (1), 125 мм (2), 220 мм (3)

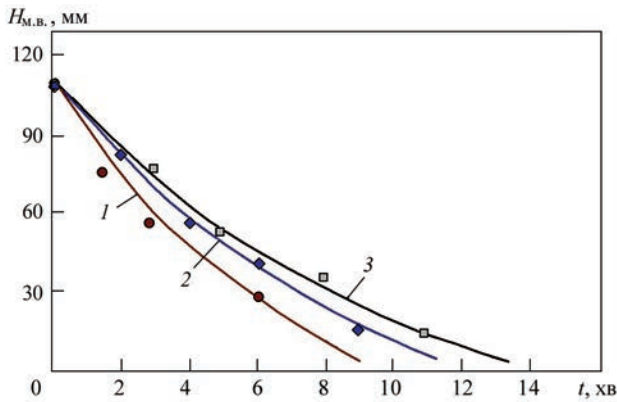


Рис. 3. Динаміка зміни глибини металевої ванни при ЕШП зливків діаметром 125 мм після відключення напруги (1), зниження напруги до 5 В (2), зниження напруги до 10 В (3): $U_{пл} = 38$ В; $I_{пл} = 5200$ А

чиною 5 В збільшує тривалість твердіння металевої ванни в середньому на 25...30 %, а величиною 10 В — на 45...50 %.

На рис. 4 наведені графіки зміни температури різних ділянок металевої ванни (а потім затверділого металу) при виплавці зливка діаметром 125 мм після відключення напруги. Результати вимірювань показали, що різниця температур в центральній (на відстані від осі $0,25 \times R_{зл}$) і периферійній (на відстані від осі $0,75 \times R_{зл}$) зонах металевої ванни відносно невелика і становить приблизно 50...70 °С. При цьому криві зміни температури різних ділянок ванни схожі і повторюють одна одну з певним інтервалом температур. Загалом, перші 2...3 хв після відключення напруги відбувається інтенсивне охолодження металу зі швидкістю в середньому 160...180 град/хв, потім швидкість охолодження значно уповільнюється (рис. 4).

Відносно невисоку різницю температур у ванні, отриману в експериментах (50...70 °С), можна пояснити невеликим розміром зливка, що виплавлялися (діаметром 125 мм). Очевидно, що при ЕШП зливків промислових розмірів (діаметром 500 мм і більше) різниця температур різних ділянок ванни (зливка) може бути помітно вищою.

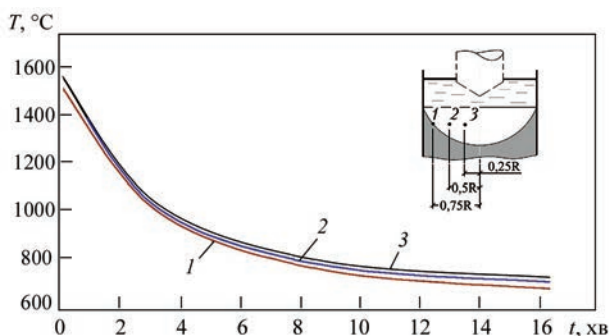


Рис. 4. Динаміка зміни температури металу при ЕШП зливка діаметром 125 мм після відключення напруги (1–3 місця вимірювання температури): $U_{пл} = 38$ В; $I_{пл} = 4800$ А

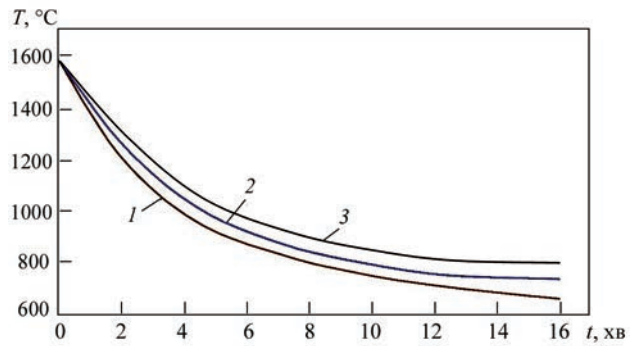


Рис. 5. Динаміка зміни температури металу при ЕШП зливків діаметром 125 мм після відключення напруги (1), зниження напруги до 5 В (2), зниження напруги до 10 В (3): $U_{пл} = 38$ В; $I_{пл} = 5200$ А (місце вимірювання температури — $0,5 \times R_{зл}$)

На рис. 5 представлені графіки зміни температури металу (на відстані від осі $0,5 \times R_{зл}$) у разі відключення напруги, а також при зниженні напруги на ванні до 5 і 10 В. З наведених графіків видно, що в останніх випадках швидкість охолодження металу помітно уповільнюється. Так, при повному відключенні напруги за перші 2 хв метал охолонув до 1220 °С, в той час як при інших двох випадках — до 1280 і 1340 °С відповідно. Також слід зауважити, що при зниженні напруги до 5 В температура металу протягом 12...14 хв зменшувалась, а потім стабілізувалася на рівні 730 °С. Тобто досягався тепловий баланс між кількістю тепла, що вводиться через підігрів шлакової ванни і відводиться в кристалізатор, електрод і атмосферу печі. При зменшенні напруги до 10 В температура ванни стабілізувалася на рівні 820 °С (рис. 5).

На рис. 6 наведені дані щодо динаміки зміни температури ванни (а потім затверділого металу) після відключення напруги при ЕШП зливків різних діаметрів. Вони показують, що тривалість охолодження зливка діаметром 85 мм до температури 500 °С становить біля 6 хв, діаметром 125 мм — 22 хв, діаметром 220 мм — 60 хв.

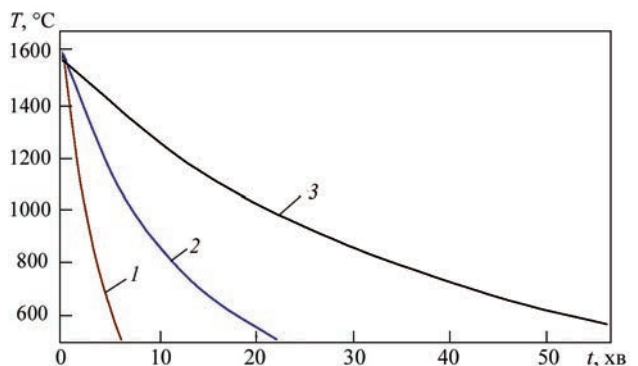


Рис. 6. Динаміка зміни температури ванни (металу) після відключення напруги при ЕШП зливків різних діаметрів: 1 — 85 мм; 2 — 125 мм; 3 — 220 мм (в усіх випадках місце вимірювання температури — $0,5 \times R_{зл}$)

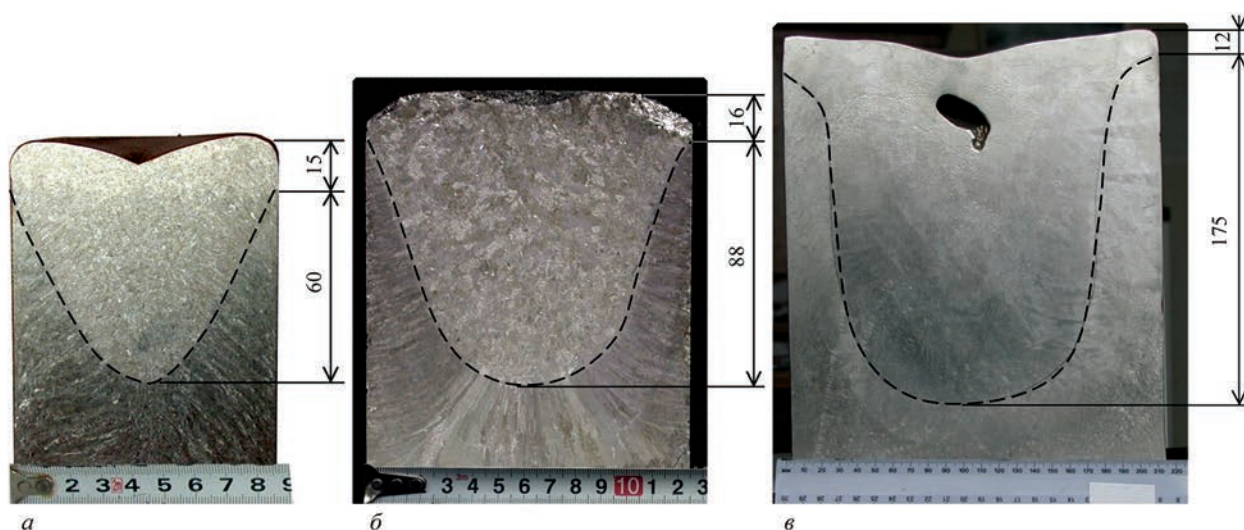


Рис. 7. Форма металевої ванни при ЕШП зливків діаметром 85 (а), 125 (б) і 220 мм (в)

Слід зауважити, що наведені вище експериментальні дані отримані в умовах охолодження зливків в водоохолоджуваних мідних глухонних кристалізаторах. Вони сильно залежать від конструкції конкретного кристалізатора і інтенсивності його водяного охолодження.

Результати експериментів з визначення форми металевої ванни при ЕШП зливків різних діаметрів наведені на рис. 7. В усіх випадках ванни мали циліндричні і конічні частини. Коефіцієнт форми ванни ($k_{ф.в.}$), який визначається відношенням глибини циліндричної частини до повної глибини ванни, в середньому становив 0,06...0,2. При цьому глибина металевої ванни в проведених експериментах дорівнювала $0,8...0,85 \times d_{зл}$, що є типовим для зливків цих діаметрів. При збільшенні діаметра зливка цей показник може значно змінюватися.

Слід підкреслити, що результати вимірювання глибини металевої ванни, отримані шляхом травлення макрощліфів (рис. 7), добре збігаються з результатами контактних вимірювань з використанням вольфрамових стрижнів (рис. 2).

На основі експериментальних даних були запропоновані емпіричні залежності для визначення характеристик твердіння зливків ЕШП в водоохолоджуваних кристалізаторах діаметром до 220 мм: час повного твердіння металевої ванни в залежності від діаметра зливка, хв

$$\tau_{п} = (0,06...0,08) k_{пд} k_{тфм} d_{зл}^2$$

де $d_{зл}$ — діаметр зливка, см; $k_{пд}$ — коефіцієнт, що враховує підігрів металу в разі неповного відключення напруги на ванні (при повному відключенні напруги $k_{пд} = 1$), $k_{тфм} = \alpha_{ст}/\alpha_{м}$ ($\alpha_{ст}$ — коефіцієнт температуропровідності вуглецевої сталі; $\alpha_{м}$ — коефіцієнт температуропровідності досліджуваного сплаву); товщина шару металу, що закристалізувався, в залежності від часу, см

$$\delta = \frac{(2,5...4,5) k_{пд} \sqrt{\tau}}{k_{тфм}},$$

де τ — час твердіння, с; температура металу зливка (ділянка на відстані $0,5 \times d_{зл}$ від верхнього торця зливка і $0,25 \times d_{зл}$ від бічної поверхні) після відключення (зменшення) напруги, °С.

$$T = T_{в} + \frac{(T_{м.в} - T_{в}) k_{пд} k_{тфм}}{e^{k_{тп} \tau}},$$

де $T_{м.в}$ — температура металевої ванни; $T_{в}$ — температура охолоджувальної води; τ — час охолодження у хвиликах; $k_{тп}$ — коефіцієнт теплопередачі, який для зливків діаметром 85, 125 і 220 мм дорівнює 0,19, 0,056 і 0,02 відповідно.

Загалом, отримані експериментальні дані можуть бути використані для перевірки результатів математичного моделювання і при розробленні імпульсних режимів електрошлакового переплаву сталей і сплавів.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено методику вимірювання температури і геометричних параметрів рідкої металевої ванни при ЕШП в умовах зменшення або відключення електричної напруги із використанням вольфрам-ренієвих термопар ВР 5/20 у захисних чохлах з карбонітриду бору BNC та вольфрамових стрижнів, що дає можливість проводити прямі вимірювання параметрів ванни в процесі ЕШП.

2. Встановлено, що термін повного твердіння металевої ванни при ЕШП зливків діаметром 85 мм складає біля 4 хв, 125 мм — 9 хв і 220 мм — 30...35 хв. Показано, що у порівнянні з повним відключенням електричної напруги підтримання напруги на електроді величиною 5 В збільшує тривалість твердіння

металевої ванни в середньому на 25...30 %, а напру- ги величиною 10 В — на 45...50 %.

3. Запропоновані емпіричні залежності для роз- рахунку температури, товщини затверділого шару і часу повного твердіння металевої ванни при ЕШП зливків діаметром до 220 мм, які дають можливість прогнозувати теплові умови процесу переплаву.

4. Отримані експериментальні результати мо- жуть слугувати основою для верифікації матема- тичних моделей і обґрунтування режимів елек- трошлакового переплаву сталей і сплавів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ/REFERENCES

1. Halfa, H., Reda, A. (2015) Electroslag remelting of high tech- nological steels. *J. of Minerals and Materials Characteriza- tion and Eng.*, **3**, 444–457. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/jmmce.2015.36047>
2. Holzgruber, W. (2016) Overview of 50 years of develop- ment in electroslag remelting in Austria. *Berg Huettenmaenn Monatsh*, **161** (Suppl 1), 2–11. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00501-016-0468-4>
3. Cao, H., Yang, W., Li, Yu. et al. (2025) Review on macroseg-regation in electroslag remelting ingot. *Steel Research Inter.*, **97**, 631–645. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.202500593>
4. Bettoni, P., Biebricher, U., Franz, H. et al. (2014) Large ESR forging ingots and their quality in production. *La Metallurgia Italiana*, **10**, 13–21
5. Yan, W., Zhang, Y., Chen, W., Li, J. (2020) Characteristics and formation tendency of freckle segregation in electroslag remelted bearing steel. *Metals*, **10**(2), 246. DOI: <https://doi.org/10.3390/met10020246>
6. Zhao, X., Sun, Z., Xia, Z. et al. (2023) Morphology control of metal pool and eutectic carbides in electroslag remelted M2 HSS with an external axial static magnetic field. *Metals*, **13**(5), 912. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13050912>
7. Xing, Li, Zhouhua, Jiang, Xin, Geng et al. (2019) Numerical simulation of a new electroslag remelting technology with current conductive stationary mold. *Applied Thermal Eng.*, **147**, 736–746. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.086>
8. Protokovilov, I., Shapovalov, V., Porokhonko V. (2021) Effect of layer-by-layer formation of ingot during electroslag remelt- ing on the quality of its surface and solidification structure. *Ironmaking & Steelmaking*, **48**(1), 62–68. DOI: <https://doi.org/10.1080/03019233.2020.1731255>
9. Protokovilov, I.V., Nazarchuk, A.T., Petrov, D.A., Poro- honko, V.B. (2019) Features of structure formation in the precision alloy 29NK in ESR with a portion ingot formation. *Sovremennaya Elektrometallurgiya*, **1**, 11–16. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2019.01.01>

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE COOLING DYNAMICS OF THE METAL POOL DURING ELECTROSLAG REMELTING

I.V. Protokovilov, V.B. Porokhonko, D.A. Petrov

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine

ABSTRACT

The results of experimental studies on the dynamics of the change in the temperature and depth of the liquid metal pool during electroslag remelting under conditions of reduced or switched-off voltage at the pool are presented. The investigations were carried out during the melting of carbon steel ingots in water-cooled copper molds with diameters of 85, 125, and 220 mm. Dependencies of the pool depth and temperature on cooling time were established for different ingot diameters and their cool- ing regimes. The profiles of the metal pool for ingots of the specified diameters were determined by preparing longitudinal macrosections. The obtained experimental data can be used for the verification of mathematical modeling results and for the development of electroslag remelting modes for steels and alloys. 9 Ref., 7 Fig.

KEYWORDS: electroslag remelting, metal pool, temperature, pool depth

ORCID

I.V. Протоковілов — <https://orcid.org/0000-0002-5926-4049>, В.Б. Порохонько — <https://orcid.org/0000-0002-6490-7221>, Д.А. Петров — <https://orcid.org/0000-0003-2937-9299>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

I.V. Протоковілов

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: lab38@paton.kiev.ua

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

I.V. Протоковілов, В.Б. Порохонько, Д.А. Петров (2026) Експериментальні дослідження динаміки охолодження металевої ванни при електрошлаковому переплаві. *Сучасна електрометалургія*, **03**, 19–23. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2026.03.03>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem>

Отримано 06.04.2026

Отримано у переглянутому вигляді 30.04.2026

Затверджено до друку 14.07.2026

Оприлюднено 24.07.2026