

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ І ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ГРАФІТОВАНОМУ ГНОВОМУ ЕЛЕКТРОДІ ДЛЯ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ ЗМІННОГО СТРУМУ

І.В. Кривцун, С.В. Римар, **О.Г. Богаченко**, І.О. Гончаров, І.О. Нейло, Р.С. Губатюк, О.Т. Зельніченко

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

РЕФЕРАТ

Представлено результати математичного моделювання електричних і теплових процесів в графітованому гнотовому (композитному) електроді для дугових сталеплавильних печей змінного струму. Зроблено порівняння з аналогічними процесами в монолітному електроді і визначені закономірності цих процесів. Розрахунки виконані за розробленою математичною моделлю на основі методу скінчених елементів із введенням ряду спрощень і припущень. Досліджено розподіл густини струму, електричного потенціалу, магнітної індукції і температури в електроді, що дозволяє прогнозувати роботу гнотових електродів в дугових печах. Оціночні результати розрахунків показують, що гнотовим електродам в разі їх роботи на змінному струмі притаманні також, як і на постійному струмі, менші електричні втрати і температури їх нагрівання в порівнянні з монолітними електродами, що робить їх більш енерго- та ресурсоефективними. Бібліогр. 12, рис. 9.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: гнотові (композитні) електроди, монолітні електроди, дугові сталеплавильні печі, змінний струм, розподіл густини струму, розподіл електричного потенціалу, розподіл температури, енергоефективність, ресурсоефективність

ВСТУП

Дана робота є логічним продовженням статті [1], в якій розглядалися електричні і теплові процеси в графітованих гнотових (композитних) електродах для дугових сталеплавильних печей постійного струму. В роботі розглядаються подібні процеси, але вже для електродів печей змінного струму. Це природно, оскільки 80 % дугових сталеплавильних печей в світі працює саме на змінному струмі [2]. Ємність таких печей дорівнює 15...180 т сталі.

Оскільки виробництво електросталі є вкрай ресурсо- і енергоємним, то подовження строку використання високовартісних графітованих електродів і зменшення споживання електроенергії дає суттєву економію ресурсів й зменшення негативних впливів процесу виплавляння металу на навколишнє середовище. Також важлива економія високовартісних матеріалів, таких як феросплави і легуючі речовини. Практикою використання графітованих гнотових електродів, які були вперше винайдені і розроблені в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, доказано їх позитивну роль у вирішенні зазначених проблем [2-4] на промислових електродугових печах змінного струму ємністю 6...50 т [5, 6].

Гнотовий (композитний) електрод, що розглядається, подібний до монолітного графітовано-

го електрода, але має по осі симетрії наскрізний отвір, щільно заповнений матеріалами, які мають у своєму складі хімічні елементи з низькою роботою виходу електронів [3, 4]. Це і є гніт.

Не всі дослідження функціонування електродів можна проводити безпосередньо на діючих промислових печах у зв'язку з високими температурами в них. Тому ряд досліджень доцільно здійснювати за допомогою сучасних методів математичного моделювання електромагнітних і температурних полів для можливості подальшого прогнозування фізико-хімічних і дифузійних процесів в системі гніт-електрод і робочій зоні дуги [7-9] та інших процесів.

Задачею роботи є визначення основних закономірностей електромагнітних і теплових процесів, які відбуваються в графітованих гнотових електродах для дугових сталеплавильних печей змінного струму.

Метою роботи є розроблення математичних моделей і виконання моделювання розповсюдження електромагнітних і температурних полів в гнотовому і монолітному електродах, через які протікає змінний електричний струм промислової частоти. Розрахунки необхідні для дослідження і прогнозування процесів, які відбуваються в гнотових електродах дугових сталеплавильних печей змінного струму й визначення впливу цих процесів на техніко-економічні показники виплавляння сталі з порівнянням із монолітними електродами.

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/>

Методологічно робота ґрунтується на закономірностях розповсюдження електромагнітних і температурних полів з використанням рівнянь Максвелла для електромагнітної частини задачі, рівнянь Фур'є, з урахуванням теплового випромінювання і конвективного теплообміну з поверхні в оточуючий простір для теплової частини задачі, закону Джоуля–Ленца, який поєднує обидві частини задачі. Використовується метод скінчених елементів, який поєднує інтегральні характеристики із значеннями характеристик досліджуваних електромагнітних і температурних полів. Враховано скін-ефект, який, хоча і не значно, але вже проявляється на суттєво нагрітих ділянках досліджуваних електродів, в зв'язку з підвищенням електричного опору графіту тіла електрода. Враховано залежність теплофізичних характеристик матеріалів від температури.

В результаті роботи необхідно отримати розрахункові картини розподілу густини струму, електричного потенціалу, магнітної індукції і температури в гнотовому та монолітному електродах в разі їх нагрівання від початку процесу й в сталому режимі, та виявити основні закономірності їх розподілу.

До оригінальності роботи слід віднести проведені дослідження розподілів густини струму, електричного потенціалу і температури в гнотовому електроді, що дозволяє прогнозувати роботу таких електродів в дугових сталеплавильних печах змінного струму.

Практичне значення роботи полягає у можливості шляхом математичного моделювання визначити тенденції впливу гнотових електродів на енергетичну, технологічну та економічну складові робочого процесу дугових сталеплавильних печей.

В зв'язку з цим актуальним є дослідження електромагнітних і теплових процесів в графітованих гнотових електродах у разі їх роботи на змінному струмі промислової частоти.

Під час побудови математичних моделей, задля здійснення оціночного розрахунку електромагнітних і теплових процесів в графітованому гнотовому і монолітному електродах, були прийняті наступні спрощення й припущення. *По-перше*, не розглядалися процеси в дузі. *По-друге*, електричний контакт струмопідводу із електродом вважався ідеальним, без врахування контактного опору в залежності від напруженості електричного поля, густини струму і об'ємних тепловиділень. *По-третє*, температура пічних газів навколо електрода і температура стінок печі по їх висоті вважалися такими, що змінюються за лінійним законом, а температура на поверхні розплавленого шлаку постійна; температура активної плями дуги на торці електрода, який дотичний з катодною або анодною областю дуги в разі зміни полярності струму на кожному його напівперіоді, задавалася

постійною і усередненою величиною між температурами катодної (нижча температура) і анодної (вища температура) плям в умовах живлення дуги постійним струмом із відповідно зворотною або прямою полярністю. Це допустимо, оскільки характерний час зміни температури на торці масивного електрода набагато більший за характерний час зміни полярності струму для промислової частоти струму 50 Гц, яким живиться дуга. Для підтвердження цього запишемо диференціальне рівняння Фур'є, наприклад, по координаті r (радіус електрода для осесиметричної задачі):

$$\gamma C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right),$$

де γ — густина матеріалу; C_p — питома теплоємність матеріалу; T — температура; t — час; λ — теплопровідність.

Це рівняння можна представити у формі запису для приросту функцій і аргументів:

$$\gamma C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{1}{r} \frac{1}{\Delta r} \left(\lambda r \frac{\Delta T}{\Delta r} \right),$$

звідки приріст часу

$$\Delta t = \frac{\gamma C_p}{\lambda} \Delta r^2.$$

Остання формула є основою критерію Фур'є.

Величина Δt може бути інтерпретована як характерний час зміни температури матеріалу електрода. Для графітованого електрода діаметром від 10 до 200 мм і його температурі від 20 до 4000 °C ця величина може знаходитися в часовому діапазоні порядку $1 \dots 10^4$ с, а зміна катодної і анодної плям на торці електрода для частоти струму 50 Гц відбувається за значно менший характерний час — 10^{-2} с.

Вчетверте, оскільки дифузійні процеси в системі гніт–електрод знаходяться ще на стадії дослідження, вони поки розглядалися як випадки незначної дифузії елементів, що опосередковано враховано деякою зміною питомих електричних опорів електрода і гноту від температури. Всі інші електричні і теплофізичні параметри не залежали від дифузії. *По-п'яте*, шлях проходження електричного струму вибирався через усю умовно нерухому поверхню активної плями дуги на нижньому торці електрода. *По-шосте*, розглядається одиничний електрод, який відокремлений від системи з трьох електродів печі [2, 6, 10]. Тобто тут не враховується сумісна дія магнітних полів трифазної системи живлення на провідники зі струмом (електроди), а відповідно не враховується ефект близькості й сили Лоренця, які в трифазній системі є причиною несиметричного вигорання

торців електродів відносно вертикальної осі симетрії. У відокремленому одиничному електроді вигорання його торця симетричне, що дозволяє вирішувати задачу в осесиметричному представленні. Дане спрощення дозволяє полегшити співставлення впливу на відокремлені електроди змінного і постійного [1] струмів в разі їх однакових діючих значень й однакових габаритів електродів. *По-сьоме*, оскільки струм провідності в провіднику (електроді) суттєво більший за струм зміщення, останнім можна знехтувати.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

РІВНЯННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Запишемо загальні базові рівняння Максвелла для електромагнітної задачі (електричних і магнітних полів), які використовуються в математичному моделюванні:

$$\nabla \mathbf{J} = 0; \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}; \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}; \mathbf{E} = -\nabla V - j\omega \mathbf{A}; \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A},$$

де ∇ — оператор Набла; \mathbf{J} — вектор густини струму; \mathbf{H} — вектор напруженості магнітного поля; σ — питома електрична провідність матеріалу, $\sigma = 1/\rho$, ρ — його питомий електричний опір; \mathbf{E} — вектор напруженості електричного поля; $j = \sqrt{-1}$ — уявна одиниця; ω — кутова частота струму; V — скалярний електричний потенціал; \mathbf{A} — векторний магнітний потенціал; $\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$ — вектор магнітної індукції; μ_0 — магнітна стала; μ_r — відносна магнітна проникність середовища.

Також використовується закон Ампера й збереження струму:

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \mathbf{B}) + \sigma \nabla V + j\omega \sigma \cdot \mathbf{A} = 0.$$

Запишемо граничні умови для електричних і магнітних полів. *По-перше*, електричної (окрім поверхонь підведення і відведення струму) й магнітної ізольованості розрахункової області, включаючи замкнену область газового середовища навколо електрода між поверхнями підведення і відведення струму:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0; \mathbf{n} \cdot \mathbf{A} = 0,$$

де \mathbf{n} — одиничний нормальний вектор.

По-друге, електричний потенціал на верхній клемі $V = 0$. На активній плямі дуги на нижній поверхні торця електрода задається значення струму I_0 , що протікає в електроді (для змінного струму — амплітудне значення).

Рівняння Фур'є для нестационарної (змінної в часі) теплової задачі, яке описує розподіл температурного поля для теплообміну в електроді:

$$\gamma(T) C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla[\lambda(T) \nabla T] = Q,$$

де Q — питома потужність джерел тепла (під час нагрівання тіла електричним струмом розподіл об'ємних тепловиділень в ньому $Q = \mathbf{J}^2/\sigma$). Параметри γ , C_p , λ тут залежать від температури T .

Перший член визначає нестационарність процесу теплообміну, другий — визначає перенесення теплоти теплопровідністю.

В разі стаціонарної задачі перший член у цьому виразі буде дорівнювати нулю і зникне з рівняння.

Область газового середовища навколо електрода між поверхнями підведення і відведення струму в теплової задачі не задіяна.

Граничні умови для теплової задачі наступні. *По-перше*, на активній плямі дуги на нижній поверхні торця електрода діє умова 1-го роду — ізотермічна умова постійного значення температури: для монолітного електрода $T_0 = 4440$ °C [8]; для гнотового електрода $T_0 = 4000$ °C. Для гнотового електрода значення температури вираховано із співвідношення температур дуг для монолітного [11] і гнотового [12] електродів, де температура дуги гнотового електрода на 15...20 % нижча за температуру дуги монолітного електрода. Зроблене припущення, що температура катодних плям дуги для таких електродів має приблизно таку ж різницю [1], а для катодно-анодних плям дуги меншу — 10...15 %. *По-друге*, по всій площині поверхні електрода, окрім активної плями дуги, діє умова 3-го роду, що враховує відтік тепла q_h за рахунок конвективного теплообміну з оточуючим середовищем

$$-\mathbf{n} \cdot [-\lambda(T) \nabla T] = \alpha(T_{ext} - T) = q_h.$$

Тут α — коефіцієнт конвективного теплообміну, який може задаватися різним на різних ділянках поверхні; T_{ext} — температура оточуючого середовища, яка також може бути різною у різних ділянках електрода.

По-третьє, для врахування теплових втрат від випромінювання q_e по всій площині поверхні електрода, окрім активної плями дуги, діє умова 3-го роду і задається вираз:

$$-\mathbf{n} \cdot [-\lambda(T) \nabla T] = \varepsilon \delta (T_{amb}^4 - T^4) = q_e,$$

де ε — постійна Стефана-Больцмана; δ — коефіцієнт випромінювання поверхонь; T_{amb} — температура поверхонь, на які потрапляють промені з тіла, що випромінює.

В усталеному тепловому режимі печі, усереднено, температура розплавленого шлаку дорівнює 1620 °C; температура пічних газів у районах нижньої бічної поверхні електрода — 2500 °C і у зоні верхньої бічної поверхні електрода у склепіння печі — 1800 °C; температура поверхні бічної стінки печі над розплавленим шлаком — 1700 °C; температура поверхні бічної стінки печі у склепіння — 1500 °C.

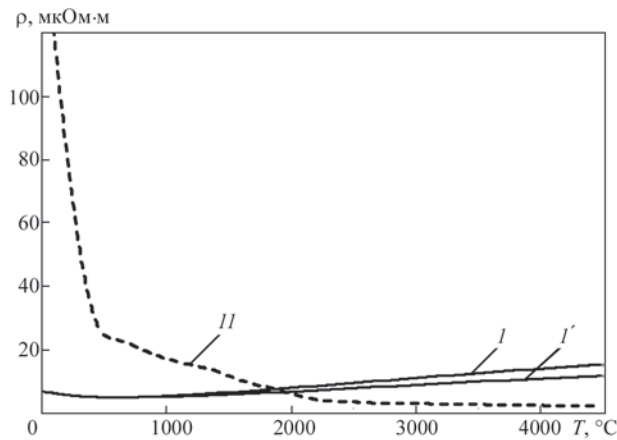


Рис. 1. Залежності питомих електричних опорів ρ від температури T : I — монолітного графітованого електрода; I' — графітованої частини (тіла) гнотового електрода, в якому відбулися дифузійні процеси системи гніт–електрод; II — гноту з дослідним складом № 11 [1]

На рис. 1 приведені залежності питомих електричних опорів ρ від температури T : I — монолітного графітованого електрода; I' — графітованої частини (тіла) гнотового електрода, в якому відбулися певні дифузійні процеси в системі гніт–електрод, які зменшили його питомий електричний опір у порівнянні із опором монолітного електрода; II — гноту дослідного складу № 11 [1] із елементами з низькою роботою виходу електронів [2–4].

З рис. 1 видно, що до температури приблизно 1900 $^{\circ}\text{C}$ значення опору гноту більше за опір електрода I' , а із зростанням температури стає меншим. За високих температур гніт стає більш електропровідний за графітоване тіло електрода і електричні втрати на суттєво нагрітих ділянках гнотового електрода стають менші за втрати на подібних ділянках монолітного електрода.

ВИПАДОК ВІДОКРЕМЛЕНИХ ВІД ПЕЧІ І ДУГИ ЕЛЕКТРОДІВ

Для аналізу температурного поля у гнотовому електроді в разі проходження по ньому змінного електричного струму і його порівняння із монолітним електродом, розглянемо спершу випадок, коли електричний струм проходить крізь відокремлені від печі і дуги електрода, які знаходяться на відкритому повітрі з температурою 20 $^{\circ}\text{C}$. Електричний струм подається між контактом верхнього струмопідводу (електродотримача) і контактом-імітатором із розмірами активної плями дуги на нижньому торці електрода. При цьому перша гранична умова теплової задачі змінюється з ізотермічної 1-го роду на однорідну адіабатичну 2-го роду, коли площа контакту із розмірами активної плями дуги термічно ізольована і через неї не проходить тепловий потік.

Для промислового гнотового електрода, що розглядається, діаметр наскрізного отвору для заповнення його гнотом дорівнює 50 мм. Для

проведеного моделювання прийнято, що гнотовий і монолітний електрода мають таку ж форму, як і електрода в печі, у яких діаметр (225 мм) у нижній частині менше за початковий діаметр (350 мм) у верхній частині в зв'язку з вигаром електрода. Висота системи електродів в печі (електродних свічок) взята 3680 мм. Приблизна розрахункова відстань від нижнього торця електрода до склепіння печі і до нижнього торця верхнього струмопідводу дорівнює відповідно 2530 і 2820 мм. Висота верхнього струмопідводу (електродотримача) — 500 мм. Через електрода для всіх варіантів розрахунку тече змінний синусоїдальний струм з діючим значенням 11 кА. Діаметр контактів, що імітують активну пляму дуги для гнотового електрода прийнято 115 мм, а монолітного електрода — 50 мм. Секції електродів з'єднані між собою монолітними графітованими ніпелями з питомими опорами на 15 % нижчими за опір монолітного графітованого електрода і на 5 % нижчим для нижнього ніпеля, якій довший час перебуває під дією високих температур печі і в якому відбулися дифузійні процеси між ним і електродом.

Розглядається осесісиметрична задача в системі координат з осями $0, z$ і $0, r$ (z — вертикальна вісь в аксіальному напрямку, r — горизонтальна вісь в радіальному напрямку) із графічним представленням на рисунках половини розрахункової області від вертикальної осі симетрії.

На рис. 2, *a* показаний розрахунковий розподіл температурного поля в гнотовому електроді в разі його нагрівання струмом 11 кА на відкритому повітрі з 20 $^{\circ}\text{C}$ до усталеної через 2 год температури, а на рис. 2, *б* — 4 пари розподілів температури нагріву по висоті електрода (координаті z) на осі симетрії електрода (більші температури в парах) та на прямолінійній бічній поверхні (менші температури в парах) із кроком 30 хв. На рис. 2, *в, г* показані аналогічні температурні поля в монолітному електроді. На рис. 2, *a, в* нижче торця електродів рисують позначена умовна границя активної плями дуги (границя контакту-імітатора).

Під час роботи в печі змінного струму робоча поверхня торця гнотового електрода набуває характерну увігнуту куполоподібну форму із загнутими вверх краями, що обумовлюється наскрізним отвором із гнотом. В монолітному електроді торець опуклий. Це пов'язано із тим, що дуга гнотового електрода суттєво відрізняється від дуги монолітного електрода геометричними і електричними параметрами. Гнотова дуга змінного струму розосереджена і її діаметр приблизно дорівнює $1/2 \dots 3/4$ діаметра торця електрода, дуже стабільна в широкому діапазоні довжин і струмових навантажень, еластична і просторово стійка, зосереджується практично на

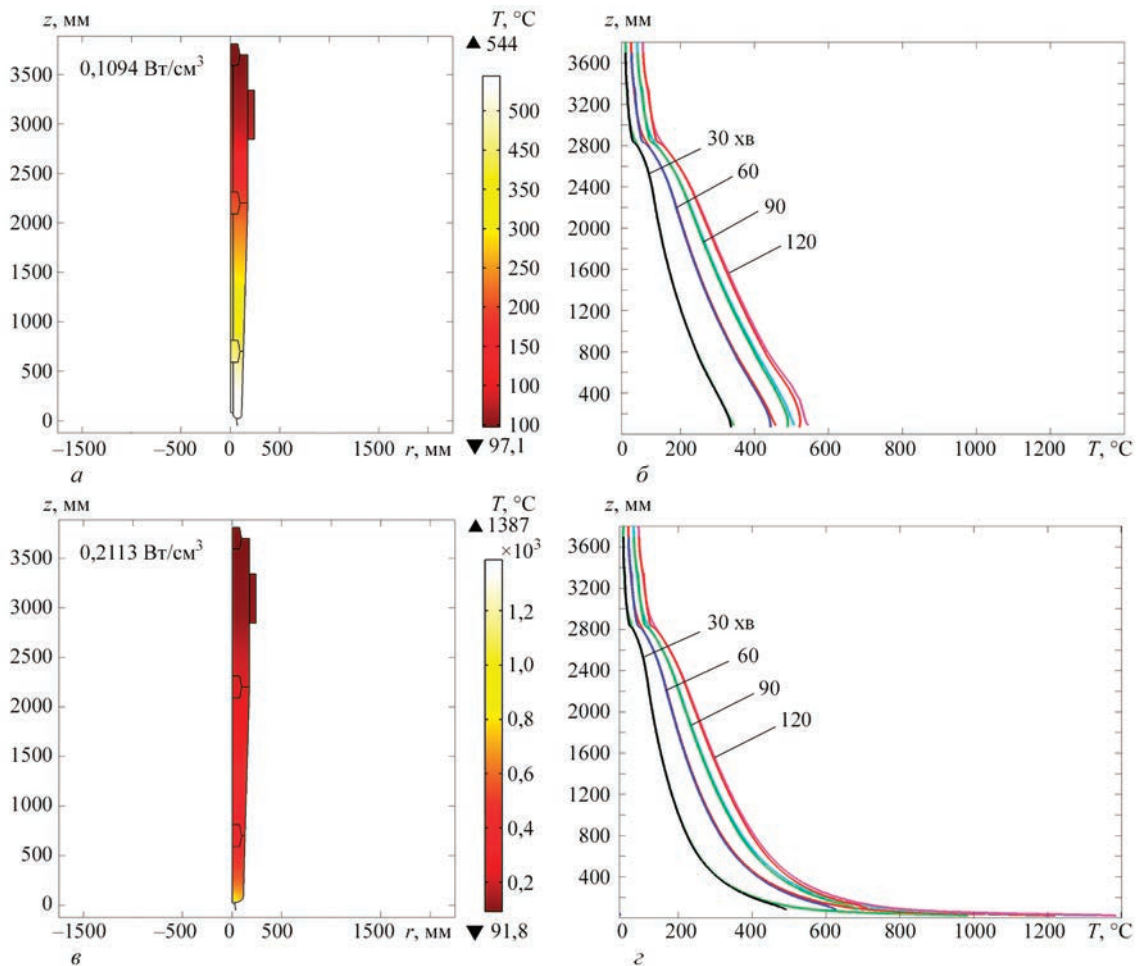


Рис. 2. Температурне поле в гнотовому електроді (а) в разі нагрівання прохідним струмом 11 кА на відкритому повітрі з 20 °С до усталеної через 2 год температури і 4 пари розподілів температури по висоті електрода (координаті z) на осі симетрії електрода (більші температури в парах) та на прямолінійній бічній поверхні (менші температури в парах) із кроком 30 хв (б), аналогічне в монолітному електроді (в) і (г)

одному місці і не мігрує по торцю електрода, характеризується високою тепловою інерційністю і меншою температурою й густиною струму, в порівнянні з дугою монолітного електрода. В монолітному ж електроді дуга сконцентрована, активна пляма дуги невелика за розміром і безупинно мігрує по поверхні торця електрода, випалюючи його й перегріваючи поверхню розплаву, призводячи до інтенсифікації випаровування основних та легуючих елементів із нього. Відповідно цьому струм в районі активної плями дуги в гнотових електроді проходить більш рівномірно через збільшену площу активної плями. Його густина не набагато перевищує густина струму в тілі електрода і нагрівання нижньої частини електрода струмом не таке значне, як у монолітному електроді, в якому струм сконцентрований у невеликій за площею активній плямі дуги.

У випадку відокремлених від печі і дуги електродів спостерігається більш ніж подвійна різниця в температурах гнотового — 544 °С (рис. 2, а і б) і монолітного — 1387 °С (рис. 2, г і д) електродів в їх нижніх частинах. Під час моделювання

нижній контакт, який імітує активну пляму дуги, є нерухомий і не враховує переміщення плями для монолітного електрода. Це призводить до отримання декілька завищеної температури, але тенденція розподілу температур зберігається. Загальні питомі резистивні електричні втрати у всьому об'ємі гнотового електрода на рис. 2, а (від верхнього торця електродотримача до нижнього торця електрода) дорівнює 0,1094 Вт/см³, а монолітного на рис. 2, в — 0,2113 Вт/см³. Вдвічі більші втрати в монолітному електроді обумовлені підвищеною густиною струму у нижній частині електрода (у зоні контакту-імітатора).

Таким чином, у випадку проходження електричного струму крізь електроди, які знаходяться на відкритому повітрі, електричні втрати і температури в гнотовому електроді практично удвічі нижчі ніж у монолітному електроді. Це дозволяє прогнозувати більш високу енергетичну ефективність гнотових електродів, ніж монолітних, а також менше вигорання гнотових електродів і їх більшу ресурсну ефективність.

**ВИПАДОК ТЕПЛООВОГО ВПЛИВУ
НА ЕЛЕКТРОД АКТИВНОЇ ПЛЯМИ ДУГИ,
ПОВЕРХНІ РОЗПЛАВУ,
ПІЧНИХ ГАЗІВ І СТІНОК ПЕЧІ**

Далі будемо розглядати усталені теплові режими в разі впливу на електрод зазначених факторів.

На рис. 3, *a* представлено розрахункове температурне поле в гнотовому електроді, а на рис. 3, *б* — залежності температури по висоті електрода (координаті z) на осі симетрії електрода (крива 1) та на прямолінійній бічній поверхні (крива 2). На рис. 3, *в* і *г* — в монолітному електроді. Порівнюючи ці залежності можна бачити, що розподіли температури в електродах до, орієнтовно, 1900 °C дуже близькі, хоча в гнотовому електроді температура трішки вища, оскільки питомий електричний опір гноту (рис. 1) до температури 1900 °C більший за опір графітованого тіла електрода і тепловиділення в гнотовому електроді на більшій його частині більше. Вище температури 1900 °C питомий електричний опір гноту стає меншим за опір графітованого тіла електрода і тепловиділення в електроді зменшується, як і в порівнянні з монолітним електродом.

В монолітному електроді більш високі показники температур фіксуються в зоні невеликої за розміром активної плями дуги, куди спрямовується струм, викликаючи суттєві значення його густини і інтенсивне нагрівання цієї зони електрода. Значний внесок в рівень температур в торцях електродів вносить також температура активних плям дуги. Оскільки площа активної плями дуги в гнотовому електроді не набагато менша площі торця електрода, то і теплові потоки з неї прогривають торець електрода на суттєву глибину. Але температура самої активної плями дуги цих електродів менша за температуру плями монолітного електрода. Зростання значень температур у торців електродів ілюстровані на рис. 3.

У всьому об'ємі монолітного електрода (від верхнього торця електродотримача до нижнього торця електрода) спостерігаються також більші ніж у 2,5 рази питомі резистивні електричні втрати — 0,3804 Вт/см³ (рис. 3, *в*), в порівнянні з гнотовим електродом — 0,1417 Вт/см³ (рис. 3, *a*).

Розглянемо картину розподілу діючих значень густини струму в електродах.

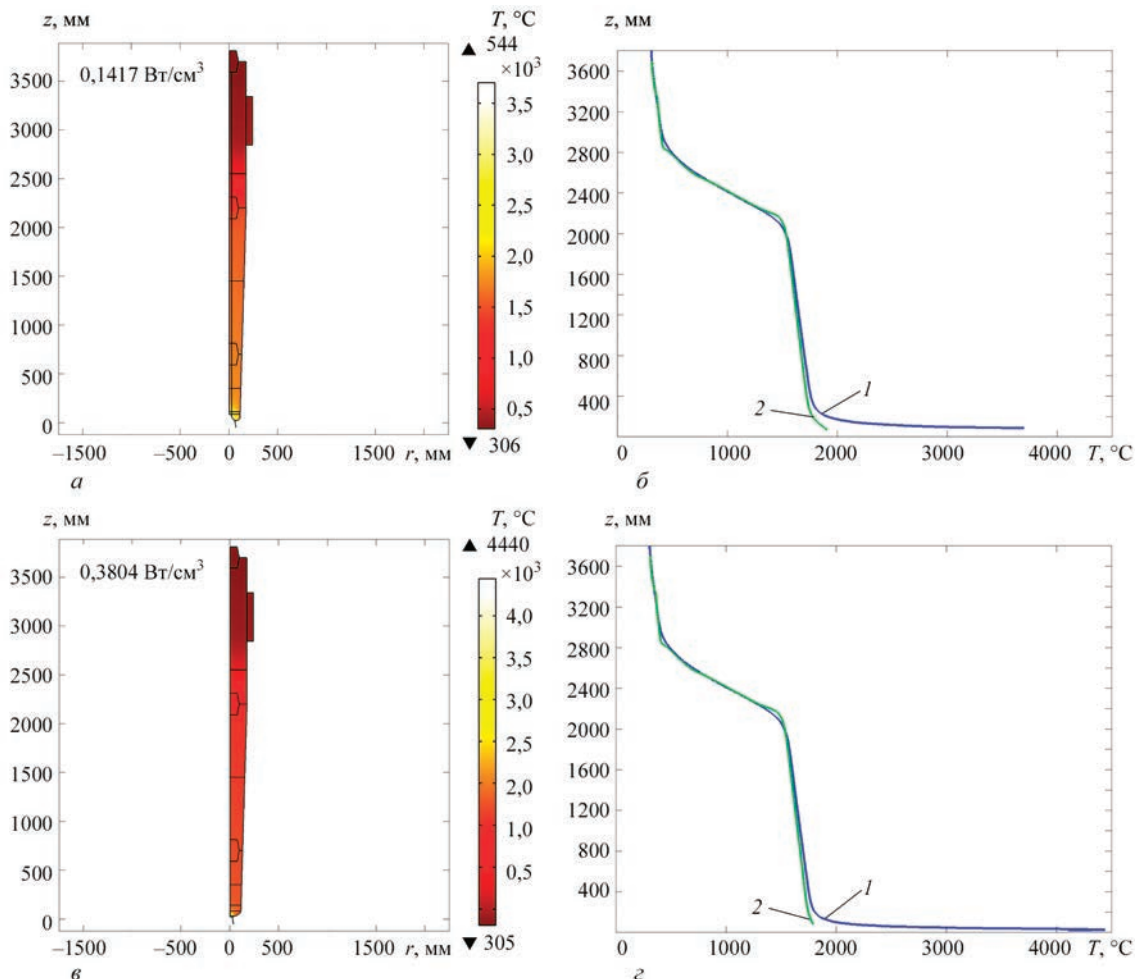


Рис. 3. Температурне поле в гнотовому електроді (*a*) і залежності температури по висоті електрода (координаті z) на осі симетрії електрода (крива 1) та на прямолінійній бічній поверхні (крива 2) (*б*); аналогічне в монолітному електроді (*в*) і (*г*)

На рис. 4, *a* показано розподіл густини струму в гнотовому електроді, а на рис. 4, *б* — збільшене зображення торця електрода. На рис. 4, *в* і *г* — в монолітному електроді. Видно, що розподіл густини струму в електроді корелюється із їх питомими електричними опорами для різних температур (рис. 1). На ділянках з більшим значенням опору гноту густина струму в них менша, ніж в тілі самого електрода на прилеглих ділянках і навпаки. Найбільша густина струму спостерігається поблизу активної плями дуги монолітного електрода, що обумовлює високу температуру в цій зоні і її підвищений торцевий вгвар. Питомі резистивні електричні втрати в гнотовому електроді менші, ніж у монолітному електроді приблизно на 63 %. Оскільки електричні втрати пропорційні квадрату струму, то можна прогнозувати, що приблизно на 7...8 % можливо піднімати струмове навантаження гнотових електродів в процесі плавлення до зрівняння електричних втрат в гнотових і монолітних електроді. Це підвищить продуктивність плавлення сталі і економію електричної енергії.

На рис. 5 показані криві зміни густини струму по висоті електродів (координаті z) на осі симетрії електрода (крива 1), на границі гноту і тіла електрода (крива 2), на поверхні електрода (крива 3). На рис. 5, *a* — в гнотовому електроді, на рис. 5, *б* — в монолітному електроді. Горби на кривих співпадають з ділянками розташування ніпелів.

На рис. 6 представлені криві зміни густини струму в радіальному напрямку (координаті r) на різній висоті (перерізи 1...5, див. рис. 4). На рис. 6, *a* — в гнотовому електроді, на рис. 6, *б* — в монолітному електроді. Розриви кривих на рис. 6, *a* в гнотовому електроді співпадають з границями сполучення гноту і тіла електрода, у яких різні значення питомих електричних опорів.

Розподіл густини струму в електроді на рис. 5 і 6 також корелюється із значеннями їх питомих електричних опорів за різних температур (рис. 1). Наочно видно, що суттєві значення густини струму спостерігаються поблизу нижніх торців електродів, які на порядок вище, ніж на більшій протяжності електродів.

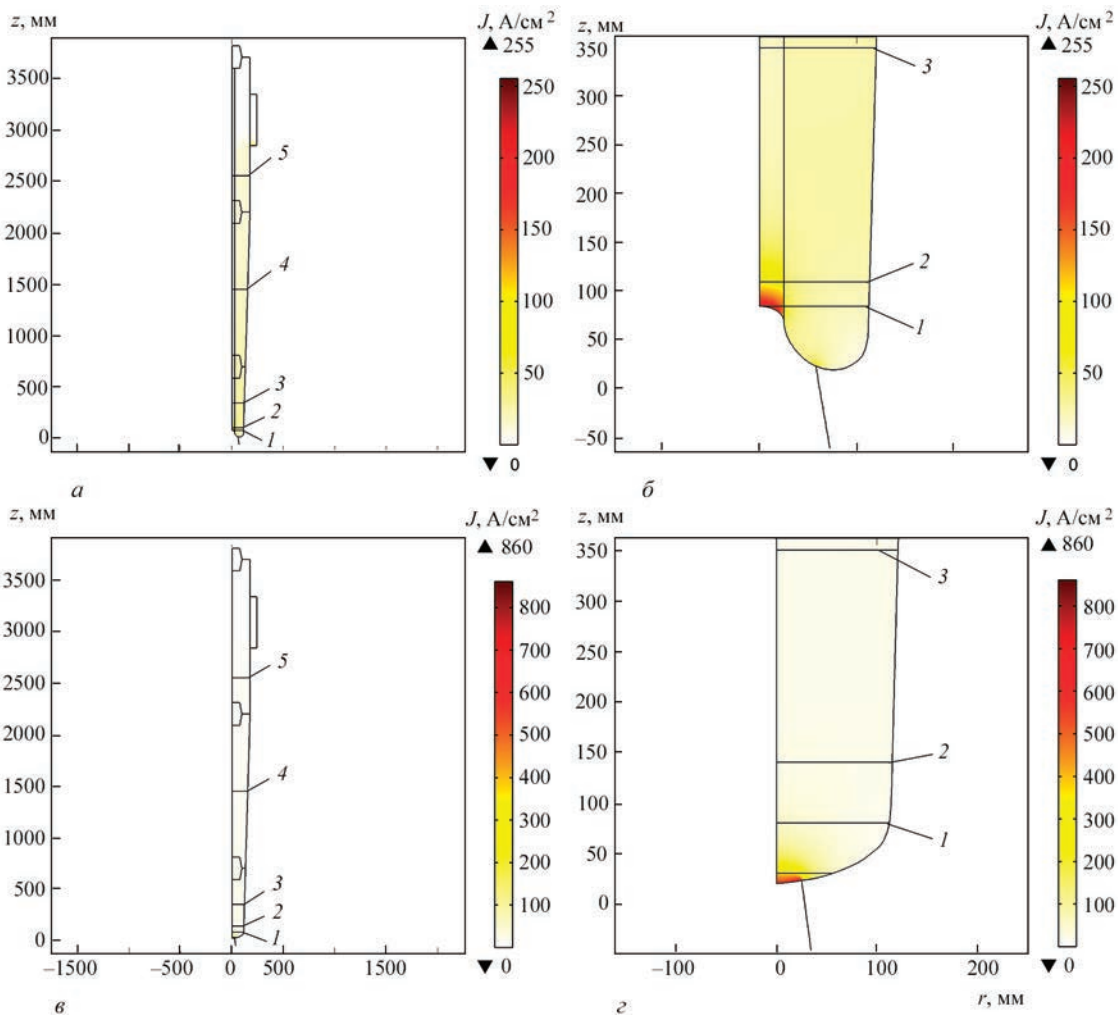


Рис. 4. Розподіл густини струму в гнотовому електроді (*a*) і збільшене зображення торця електрода (*б*); аналогічне в монолітному електроді (*в*) і (*г*)

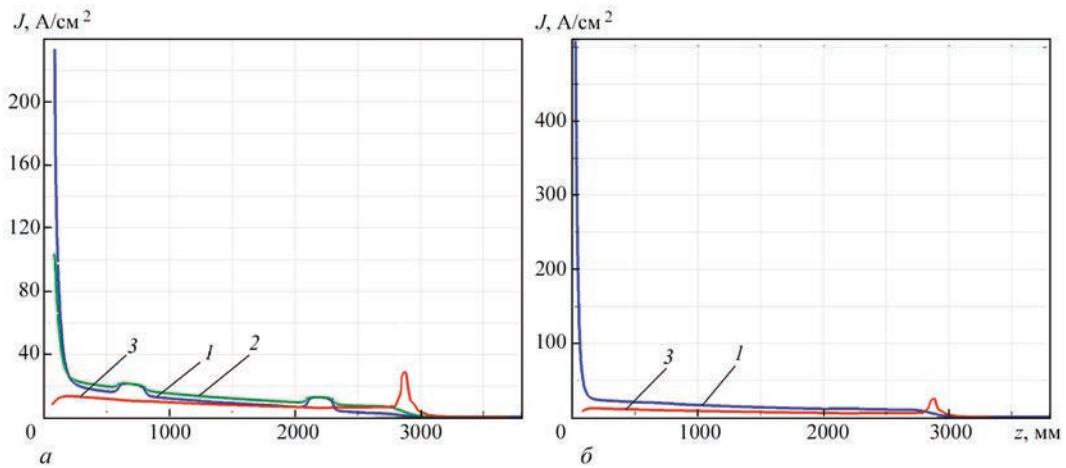


Рис. 5. Криві густини струму по висоті електродів (координати z) на осі симетрії електрода (крива 1), на границі гноту і тіла електрода (крива 2), на поверхні електрода (крива 3) в гнотовому електроді (а); в монолітному електроді (б)

На рис. 7 наведені криві температур в радіальних розрізах (координати r) на різній висоті (перерізи 1...5, див. рис. 4). На рис. 7, а — в гнотовому електроді, на рис. 7, б — в монолітному.

На рис. 8, а представлено розрахунковий розподіл електричного потенціалу (діючі значення) в тілі гнотового електрода, а на рис. 3, б — криві електричного потенціалу по висоті електрода (координати z) на осі симетрії електрода (крива 1)

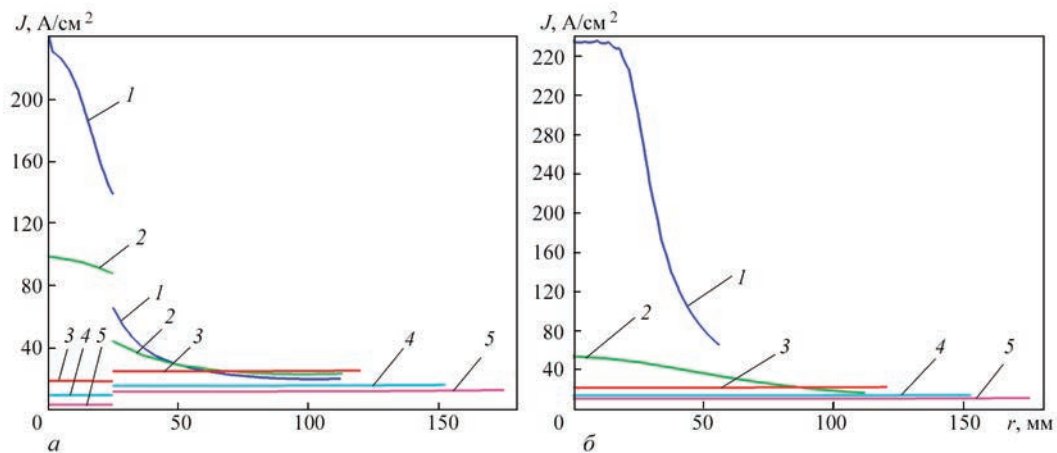


Рис. 6. Криві густини струму в радіальному напрямі (координати r) на різній висоті (перерізи 1...5, див. рис. 4) в гнотовому електроді (а); в монолітному електроді (б)

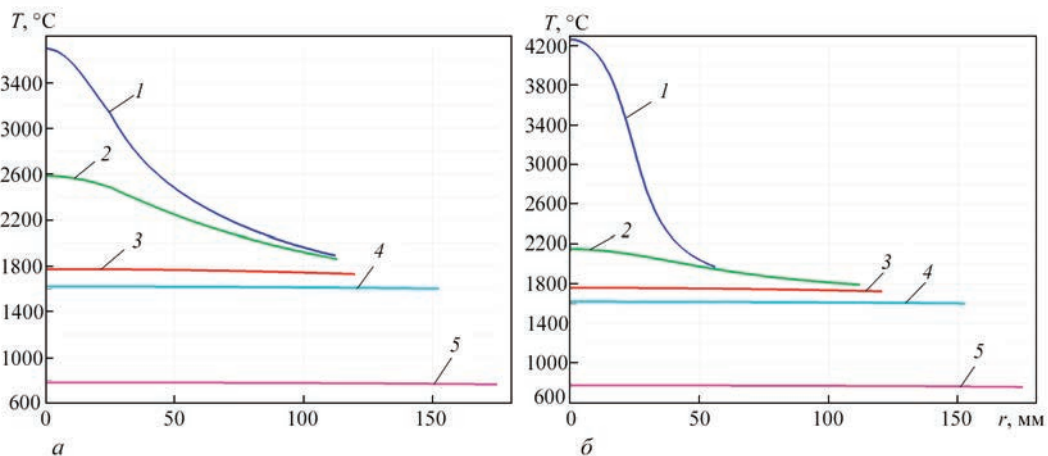


Рис. 7. Криві температур в радіальному напрямі (координати r) на різній висоті (перерізи 1...5, див. рис. 4) в гнотовому електроді (а); в монолітному електроді (б)

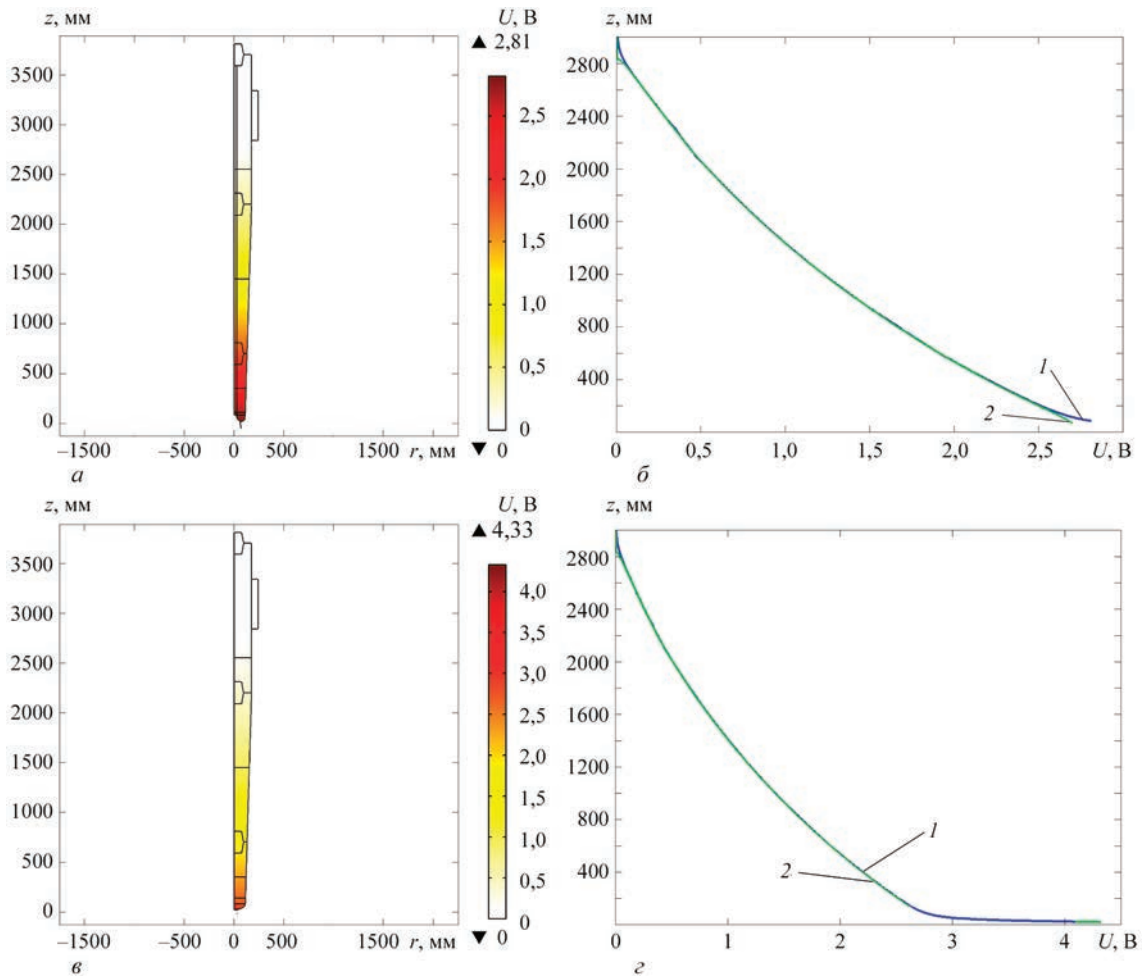


Рис. 8. Розподіл електричного потенціалу в тілі гнотового електрода (*a*) і криві електричного потенціалу по висоті електрода (координати z) на осі симетрії електрода (крива *1*) та на прямолінійній бічній поверхні (крива *2*) (*б*); аналогічне в монолітному електроді (*в*) і (*г*)

та на прямолінійній бічній поверхні (крива *2*). На рис. 8, *в* і *г* — в монолітному електроді. Електричний потенціал на більшій протяжності гнотового електрода вищий, ніж у монолітного, в зв'язку із тим, що електричний опір розглянутого складу гноту за температур, приблизно до 1900 °С більший за опір монолітного електрода.

На рис. 9, *a* показано розподіл магнітної індукції (амплітудне значення) для гнотового електрода, на рис. 9, *б* — для монолітного. Більші значення магнітної індукції спостерігаються поблизу нижніх торців електродів.

Проведені розрахунки показують значну перевагу гнотових електродів над монолітними в

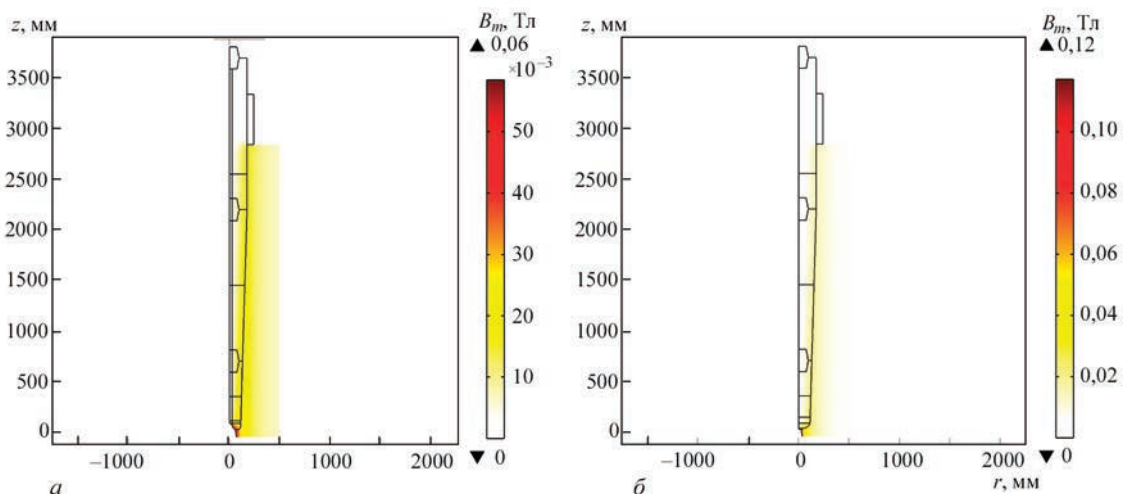


Рис. 9. Розподіл магнітної індукції для гнотового електрода (*a*); для монолітного електрода (*б*)

плані ресурсо- і енергозбереження під час роботи печі на змінному струмі. Це підтверджується багатократними плавками конструкційних й корозійностійких сталей на промислових дугових сталеплавильних печах змінного струму, ємністю 50...60 т в умовах «Електрометалургійного заводу «Дніпрспецсталь» ім. А.М. Кузьміна» (ПРАТ «Дніпрспецсталь»), Україна.

Подальші дослідження повинні стосуватися більш поглибленого вивчення електромагнітних, теплових і термохімічних процесів в гнотових електродах і удосконаленню математичної моделі, в тому числі із врахуванням одночасної роботи трьох електродів трифазної печі змінного струму.

ВИСНОВКИ

1. Розроблена математична модель для чисельного моделювання електромагнітних і теплових процесів в графітованому гнотовому (композитному) і монолітному електродах дугових сталеплавильних печей змінного струму, які відокремлені від системи з трьох електродів трифазної печі.

2. Модель дозволяє визначати розподіл електромагнітних і температурних полів, електричного потенціалу і густини струму в електродах, будувати залежності визначених характеристик від ряду параметрів із врахуванням залежності питомих електричних опорів гноту і тіла електрода від температури.

3. Для гнотового електрода значення електричного опору гноту за температур, приблизно до 1900 °С більше за опір графітованого тіла електрода. Відповідно, опір ділянки гнотового електрода за цих температур перевищує опір подібної ділянки монолітного електрода. Із зростанням температури вище зазначеного рівня електричний опір гноту стає меншим за опір графітованого тіла електрода і опір гнотового електрода на такій ділянці стає меншим за опір аналогічної ділянки монолітного електрода.

4. В здійсненому аналізі прийнято до уваги, що дуга змінного струму на гнотовому електроді розосереджена (її діаметр приблизно дорівнює $1/2...3/4$ діаметра торця електрода), просторово стійка, еластична, дуже стабільна в широкому діапазоні довжин і електричних режимів, має високу теплову інерційність і меншу температуру. В монолітному ж електроді дуга сконцентрована, активна пляма дуги невелика і постійно мігрує по поверхні торця електрода, випалюючи його й перегрівуючи поверхню розплаву, що призводить до інтенсифікації випаровування основних та легуючих елементів із нього.

5. Показано, що струм в районі активної плями дуги в гнотовому електроді (діаметр плями на основі експериментальних даних прийнятий рівним 115 мм) проходить відносно рівномірно через збільшену її площу, має меншу густину, в порівнянні з

монолітним електродом, і нагрівання нижньої частини електрода струмами не таке значне, як у монолітному електроді, в якому струм сконцентрований в невеликій за площею активній плямі дуги (з прийнятим із експериментів діаметром 50 мм).

6. У випадку проходження змінного електричного струму крізь відокремлений від печі і дуги електрод, який знаходиться на відкритому повітрі за температури 20 °С, електричні втрати і температури в гнотовому електроді нижчі, ніж у монолітному, що дозволяє прогнозувати енергетичну ефективність гнотових електродів вищу, ніж монолітних, а також менші витрати матеріалу гнотових електродів на вигорання, а відповідно, їх більшу ресурсну ефективність. Температура нижньої торцевої частини гнотового електрода склала 544 °С, а монолітного — 1387 °С. Загальні питомі резистивні електричні втрати у всьому об'ємі електродів за тих же умов (поза піччю) і діючому значенні струму 11 кА дорівнюють для гнотового електрода 0,1094 Вт/см³, а для монолітного — 0,2113 Вт/см³. Вдвічі більші втрати в монолітному електроді обумовлені концентрацією струму біля контакту, що імітує активну пляму дуги.

7. За теплових впливів на електрод активної плями дуги (для монолітного електрода — 4440 °С, для гнотового електрода $T_0 = 4000$ °С), розплаву, пічних газів і стінок печі розраховані загальні питомі резистивні електричні втрати в усьому об'ємі дослідженого гнотового електрода склала 0,1417 Вт/см³ і вони менші, ніж у монолітного електрода (0,3804 Вт/см³) приблизно на 63 %. Можна прогнозувати, що струмове навантаження в гнотових електродах в процесі плавлення можливо підвищити приблизно на 7...8 % до зрівняння електричних втрат в гнотових і монолітних електродах, що підвищить продуктивність плавлення сталі і дасть економію електричної енергії.

8. За результатами проведеного розрахунку із прийнятими в математичній моделі спрощеннями і допущеннями можна стверджувати, що гнотові електроди мають менші електричні втрати, меншу температуру робочого торця електрода, в порівнянні із монолітними електродами, що робить перші більш енерго- і ресурсоефективними. Це підтверджується і на практиці під час використання такого типу електродів в промислових дугових сталеплавильних печах змінного струму в умовах «Електрометалургійного заводу «Дніпрспецсталь» ім. А.М. Кузьміна».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ/REFERENCES

- Rymar, S.V., Bogachenko, O.G., Honcharov, I.O. et al. (2023) Mathematical modeling of electric and thermal processes in graphitized wick electrodes for dc arc steelmaking furnaces. *Suchasna Elektrometalurhiya*, 3, 28–39 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2023.03.05>
- Paton, B.E., Bogachenko, O.G., Kiyko, S.G. et al. (2021) Experience of application of graphitized wick electrodes

- in industrial steel-making AC furnace. *Suchasna Elektrometalurhiya*, **1**, 48–53 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2021.01.06>
3. Paton, B.E., Lakomsky, V.I., Galinich, V.I., Mishchenko, D.D. (2011) Cored electrodes of electric arc furnaces. *Chyorn. Metally*, **5**, 13–15 [in Russian].
 4. Bogachenko, A.G., Mishchenko, D.D., Braginets, V.I. et al. (2016) Saving of electric power at the arc steel melting furnaces of direct current with graphitized cored electrodes. *Sovremennaya Elektrometallurgiya*, **1**, 58–64 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2016.01.09>
 5. Bogachenko, O.G., Mishchenko, D.D., Goncharov, I.O. (2023) Application of graphitized wick electrodes in DC arc steel furnaces. *Suchasna Elektrometalurhiya*, **1**, 53–61 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2023.01.07>
 6. Bogachenko, O.G., Chernyakov, A.V., Goncharov, I.O. et al. (2024) Application of graphitized cored electrodes in 50 ton steel melting AC arc furnace of DSV-50 type. *Suchasna Elektrometalurhiya*, **1**, 32–39 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2024.01.04>
 7. Pashatsky, N.V., Molchanov, E.A. (1998) Thermal state of electrodes of arc furnaces. *Izv. Vuzov. Chyorn. Metallurgiya*, **5**, 24–26 [in Russian].
 8. Kozhukhov, A.A., Mereker, E.E., Sazonov, A.V. (2008) To problem of temperature distribution in electrodes of arc steel-making furnace. *Izv. Vuzov. Chyorn. Metallurgiya*, **9**, 7–10 [in Russian].
 9. Mokhov, V.A., Yachikov, V.M. (2012) Modeling of thermal state of arc furnace graphitized electrode taking into account evaporation cooling. *Elektrometallurgiya*, **11**, 35–41 [in Russian].
 10. Gasik, M.M. (2024) Simulation of electric arc mode of electric furnace and analysis of its operation in real time. *Suchasna Elektrometalurhiya*, **2**, 20–24 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2024.02.03>
 11. Krikent, I.V., Krivtsun I.V., Demchenko, V.F., Pyptyuk V.P. (2013) Numerical modeling of high-current arc discharge in DC ladle-furnace unit. *Sovremennaya Elektrometallurgiya*, **3**, 45–50.
 12. Lakomsky, V.I. (1997) Oxide cathodes of electric arc. *Zapozhie, Izd-vo Internal*, 192 [in Russian].

MATHEMATICAL MODELING OF ELECTRICAL AND THERMAL PROCESSES IN A GRAPHITIZED CORED ELECTRODE FOR ALTERNATING CURRENT ARC STEELMAKING FURNACES

I.V. Krivtsun, S.V. Rymar, O.G. Bogachenko, I.O. Honcharov, I.O. Neilo, R.S. Hubatyuk, O.T. Zelnichenko
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine

ABSTRACT

The results of mathematical modeling of electrical and thermal processes in a graphitized cored (composite) electrode for alternating current arc steelmaking furnaces are presented. A comparison is made with similar processes in a monolithic electrode and the regularities of these processes are determined. The calculations are performed using the developed mathematical model based on the finite element method with the introduction of a number of simplifications and assumptions. The distribution of current density, electric potential, magnetic induction and temperature in the electrode is studied, which allows predicting the operation of cored electrodes in arc furnaces. The estimated results of the calculations show that cored electrodes, when operating on alternating current, are characterized by lower electrical losses and heating temperatures compared to monolithic electrodes, which makes them more energy and resource efficient. 12 Ref., 9 Fig.

KEYWORDS: cored (composite) electrodes, monolithic electrodes, arc steelmaking furnaces, alternating current, current density distribution, electric potential distribution, temperature distribution, energy efficiency, resource efficiency

ORCID

I.V. Кривцун — <https://orcid.org/0000-0001-9818-3383>, С.В. Рymar — <https://orcid.org/0000-0003-0490-4608>,
О.Г. Богаченко — <https://orcid.org/0000-0002-3306-6626>, І.О. Гончаров — <https://orcid.org/0000-0003-2915-0435>,
І.О. Нейло — <https://orcid.org/0009-0003-4771-3630>, Р.С. Губатюк — <https://orcid.org/0000-0002-0851-743X>.
О.Т. Зельніченко — <https://orcid.org/0009-0006-4604-4561>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

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

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

I.V. Krivtsun, S.V. Rymar, O.G. Bogachenko, I.O. Goncharov, I.O. Neilo, R.S. Hubatyuk, O.T. Zelnichenko (2026) Математичне моделювання електричних і теплових процесів в графітованому гнотовому електроді для дугових сталеплавильних печей змінного струму. *Сучасна електрометалургія*, **01**, 27–37.
DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2026.01.04>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

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

Отримано 26.01.2026

Отримано у переглянутому вигляді 01.02.2026

Затверджено до друку 31.03.2026

Оприлюднено 14.04.2026