

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ І ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ГРАФІТОВАНИХ ГНОТОВИХ ЕЛЕКТРОДАХ ДЛЯ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

С.В. Римар, О.Г. Богаченко, І.О. Гончаров, І.О. Нейло, Г.В. Кузьменко, Р.С. Губатюк

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: stement@ukr.net

Представлено результати математичного моделювання електричних і теплових процесів в графітованих гнотових (композитних) і монолітних електродах для сталеплавильних печей постійного струму. Розрахунки здійснено за допомогою розробленої математичної моделі на основі методу скінченних елементів при введенні ряду спрощень і припущень. Модель дозволяє визначити закономірності електричних і теплових процесів, що протікають в електродах. Досліджено розподіл густини струму, електричного потенціалу і температури в композитних електродах при застосуванні різного складу гнотів із різним співвідношенням між їх питомими електричними опорами й опорами електрода, що надає можливість прогнозувати їх роботу при застосуванні в дугових печах. Результати оціночних розрахунків показали, що гнотові електроди мають менші електричні втрати і температуру їх нагрівання від монолітних електродів, що робить їх більш енерго- та ресурсоефективними. Бібліогр. 8, рис. 8.

Ключові слова: композитні (гнотові) електроди, монолітні електроди, розподіл густини струму, розподіл електричного потенціалу, розподіл температури, вплив складу гнотів, енергоефективність, ресурсоефективність

Вступ. Сучасне металургійне виробництво є дуже енергоємним, відрізняється високою складністю і взаємодією різних технологічних процесів та знаходиться під впливом жорстких вимог до охорони навколишнього середовища й економії природних ресурсів. В останні роки у світі біля 600...650 млн. т сталі виробляється в електродугових печах постійного і змінного струму. Покращення таких найважливіших показників плавки як витрати електроенергії та графітованих електродів, економія феросплавів і легуючих речовин, підвищення продуктивності печей і т. п. завжди були й будуть у центрі уваги фахівців, зайнятих у виробництві електросталі. У вирішенні цих задач істотний ефект дає використання в дугових печах графітованих гнотових (композитних) електродів. Ці електроди розроблені в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України й успішно випробувані на промислових електродугових печах постійного і змінного струму ємністю 6...50 т [1–3]. Подальше підвищення ефективності плавки із застосуванням гнотових електродів часто вимагає безпосередніх досліджень на діючих промислових печах. Однак високі температури в об'ємі печі, дуже високі температури на поверхні електродів (~ 4000 °С в зоні дуги) та інші фактори часто роблять неможливим проведення таких досліджень. В цих випадках можна застосовувати

сучасні методи математичного моделювання електричних і температурних полів для прогнозування фізико-хімічних процесів в електродах і робочих зонах дуг, дифузійних процесів в системі гніт-електрод тощо [4–6].

Задачею дослідження є визначення основних закономірностей електричних і теплових процесів, що протікають в графітованих гнотових електродах дугових сталеплавильних печей (ДСП) постійного струму.

Метою роботи є здійснення оціночного розрахунку електричних і теплових процесів в графітованих гнотових електродах для ДСП постійного струму з розробкою для цього математичної моделі із введенням ряду спрощень і припущень. Ці розрахунки необхідні для дослідження і прогнозування процесів, які відбуваються в електродах при різних електричних параметрах процесу плавлення металу, а також при різних електричних параметрах, обумовлених складом гнотів електродів.

Методологічно робота ґрунтується на закономірностях розповсюдження електричних і температурних полів з використанням рівнянь Ома при розрахунку електричної частини задачі, рівнянь Фур'є з урахуванням випромінювання і конвективного теплообміну з поверхні в оточуючий простір при розрахунку теплової частини задачі, рівнянь Джоуля–Ленца, які поєднують обидві частини. Застосо-

С.В. Римар — <https://orcid.org/0000-0003-0490-4608>, О.Г. Богаченко — <https://orcid.org/0000-0002-3306-6626>, Р.С. Губатюк — <https://orcid.org/0000-0002-0851-743X>

© С.В. Римар, О.Г. Богаченко, І.О. Гончаров, І.О. Нейло, Г.В. Кузьменко, Р.С. Губатюк, 2023

вусться метод кінцевих елементів, який сполучає інтегральні характеристики із значеннями векторних характеристик досліджуваних електричних і теплових полів. Враховано залежність фізичних властивостей матеріалів від температури.

В результаті роботи отримані розрахункові картини розподілу густини струму, електричного потенціалу і температури в гнотових та монолітних електродах при їх нагріванні в часовій області і при сталому режимі та виявлені закономірності їх розподілу.

До оригінальності роботи слід віднести вперше проведені дослідження розподілу густини струму, електричного потенціалу і температури в гнотових електродах при застосуванні різного складу гнотів, що надає можливість прогнозувати їх роботу при застосуванні в ДСП постійного струму.

Практичне значення роботи полягає у можливості розрахунковим шляхом визначати вплив складу гнотів в електродах на енергетичну, технологічну та економічну складові роботи дугових печей.

У зв'язку з цим актуальним є питання вивчення електричних і теплових процесів в графітованих гнотових електродах.

При побудові математичної моделі для здійснення оціночного розрахунку електричних і теплових процесів в графітованих гнотових електродах були прийняті спрощення та припущення. Основні із них такі: внутрішні процеси в дузі не розглядалися; електричний контакт струмопідводу в межах контактної поверхні вважався однорідним, а залежність контактного опору від напруженості електричного поля, густини струму і об'ємних тепловиділень не враховувалася; постійною величиною задавалася температура на катодній плямі стовпа дуги на торці електрода. 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; оскільки дифузійні процеси в системі гніт–електрод знаходяться на стадії вивчення, вони розглядалися як випадки незначної дифузії елементів, а для одного випадку — як повна дифузія, що опосередковано враховано зміною питомих електричних опорів електрода і гнота від температури. Всі інші електричні і теплофізичні параметри не залежали від дифузії; шлях проходження електричного струму вибирався через всю, умовно нерухому, поверхню катодної плями дуги на нижньому торці електрода.

Результати досліджень. Рівняння математичної моделі. Запишемо загальні базові рівняння неперервності для стаціонарної електричної задачі,

які використовувалися при математичному моделюванні:

$$\nabla \mathbf{J} = \mathbf{Q}_j \mathbf{E}; \quad \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}_e; \quad \mathbf{E} = -\nabla V,$$

де ∇ — оператор Набла; \mathbf{J} — вектор густини струму; \mathbf{Q}_j — вектор джерел струму; σ — питома електрична провідність матеріалу, $\sigma = 1/\rho$, ρ — його питомий електричний опір; \mathbf{E} — вектор напруженості електричного поля; \mathbf{J}_e — вектор густини генерованого ззовні струму; V — векторний потенціал. Друге рівняння являє собою закон Ома в диференційній формі запису.

Задача вирішується за граничними умовами. По-перше, електричній ізольованості поверхні електрода (окрім поверхонь підведення і відведення струму):

$$\mathbf{n} \mathbf{J} = 0,$$

де \mathbf{n} — одиничний нормальний вектор.

По-друге, електричний потенціал на верхній клемі $V = 0$. На плямі катода дуги на нижній поверхні торця електрода задається значення струму I , що протікає в електроді.

Рівняння Фур'є для нестационарної теплової задачі в часовій області, яке описує розподіл температурного поля при теплообміні в електроді, наступне:

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

де γ — густина матеріалу; C_p — питома теплоємність матеріалу, що залежить від температури T ; ∂ — знак диференціалу; t — час; λ — теплопровідність, як функція від температури; Q — питома потужність джерел тепла (при нагріванні тіла постійним електричним струмом розподіл об'ємних тепловиділень в системі $Q = \mathbf{J}^2/\sigma$).

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

При стаціонарному режимі перший член у цьому виразі зникає.

Граничні умови для теплової задачі наступні. По-перше, на катодній плямі дуги на нижній поверхні торця електрода діє окремий випадок 1-го роду — ізотермічна умова постійного значення температури $T_0 = 4440$ °С [5] при монолітному електроді і $T_0 = 3600$ °С при гнотовому електроді. Останнє значення вираховано із співвідношення температур дуг для монолітного [7] і гнотового [8] електродів, де температура дуги гнотового електрода приблизно на 16...20 % нижча за температуру дуги монолітного електрода. Зроблено припу-

шення, що температура катодних плям для таких електродів має приблизно таку ж різницю.

По-друге, по всій площині поверхні, окрім катодної плями, діє випадок 3-го роду, що враховує відтік тепла q_h за рахунок конвективного теплообміну з оточуючим середовищем

$$q_h = \alpha(T_{ext} - T),$$

де α — коефіцієнт конвективного теплообміну, який задається різним на різних ділянках поверхні; T_{ext} — температура оточуючого середовища, яка також різна для різних ділянок.

По-третє, для врахування теплових втрат від випромінювання q_e по всій площині поверхні, окрім катодної плями, задається вираз:

$$q_e = \varepsilon\delta(T_{amb}^4 - T^4),$$

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

Із дослідних даних роботи сталеплавильної печі постійного струму типу ДСП ПС-12 відомо, що катодна пляма на торці монолітного графітового електрода при струмі 11 кА, усереднено, має діаметр 50 мм, площу — 19,6 см², густину струму — 561,2 А/см², питому потужність — 55,56 кВт/см², а гнотового електрода відповідно діаметр — 200 мм і площу півсфери — 314 см², густину струму — 35 А/см², питому потужність — 1,48 кВт/см². Анодна пляма на поверхні розплаву для монолітного електрода при тому ж струмі має діаметр 100 мм, площу — 78,5 см², густину струму — 140 А/см², питому потужність — 8 кВт/см², а для гнотового електрода відповідно діаметр —

230 мм, площу — 415 см², густину струму — 26,5 А/см², питому потужність — 1,75 кВт/см².

Ці данні виступають при розрахунках як перевірені, до яких треба наближатися, і як початкові значення.

У сталому тепловому режимі печі, усереднено, температура розплавленого шлаку дорівнює 1620 °С; температура пічних газів у районі нижньої бічної поверхні електрода — 2500 °С; у районі верхньої бічної поверхні електрода у склепіння печі — 1800 °С; температура поверхні бічної стінки печі над розплавленим шлаком — 1700 °С; температура поверхні бічної стінки печі у склепіння — 1500 °С.

На рис. 1 представлені залежності питомих електричних опорів (ρ) від температури (T): 1 — монолітного графітового електрода; 1' — графітованої частини гнотового електрода, в якому відбулися деякі дифузійні процеси системи гніт-електрод, які зменшили його питомий електричний опір у порівнянні із опором монолітного електрода; 11, 15, 15', 19, 19' — гнотів різних складів із елементами з низькою роботою виходу електронів [1–3], які поки не вказуються.

З рис. 1 видно, що може існувати три випадки співвідношень між питомими електричними опорами графітованої частини електрода і складу гнота: опір гнота на всій протяжності діапазону температур більше за опір електрода (це випадок з електродом 1' і гнота 15'); коли з якогось значення температури відбулася повна дифузія елементів електрода і гнота й опори електрода і гнота вирівнюються (це випадок із складом електрода 1' і гнота 19' при температурах вище 2500 °С); при температурах до 1900...2500 °С значення опору гнота більше за опір електрода, а із зростанням температури стає меншим (це найбільш поширені випадки з електродом 1' і гнотами 11, 15 і 19, які відрізняються температурами точок перетину кривих опорів електрода і гнота). В останньому випадку при високих температурах гніт стає більш електропровідний за електрод і електричні втрати в гнотових електродах стають менші за втрати в монолітних електродах.

Випадок відокремлених від печі і дуги електродів. Для аналізу розповсюдження температурного поля в гнотових електродах при проходженні по ним постійного електричного струму і їх порівняння із монолітним електродом розглянемо випадок, коли електричний струм проходить крізь відокремлені від печі і дуги електроди, які знаходяться на відкритому просторі при атмосферній температурі оточуючого середовища. Електричний струм подається між контактом верхнього

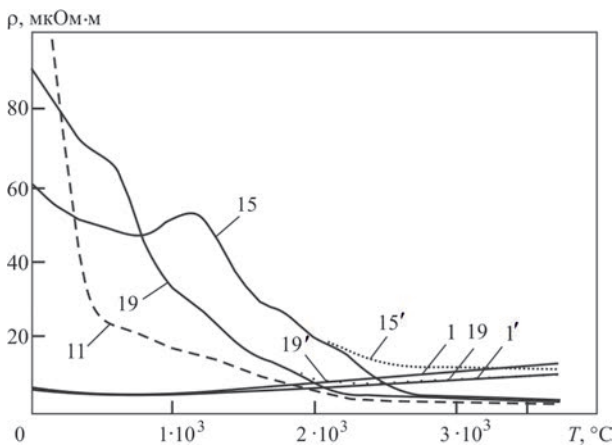


Рис. 1. Залежності питомих електричних опорів ρ від температури T : 1 — монолітного графітового електрода; 1' — графітованої частини гнотового електрода, в якому відбулися дифузійні процеси системи гніт-електрод; 11, 15, 15', 19, 19' — гнотів різних складів

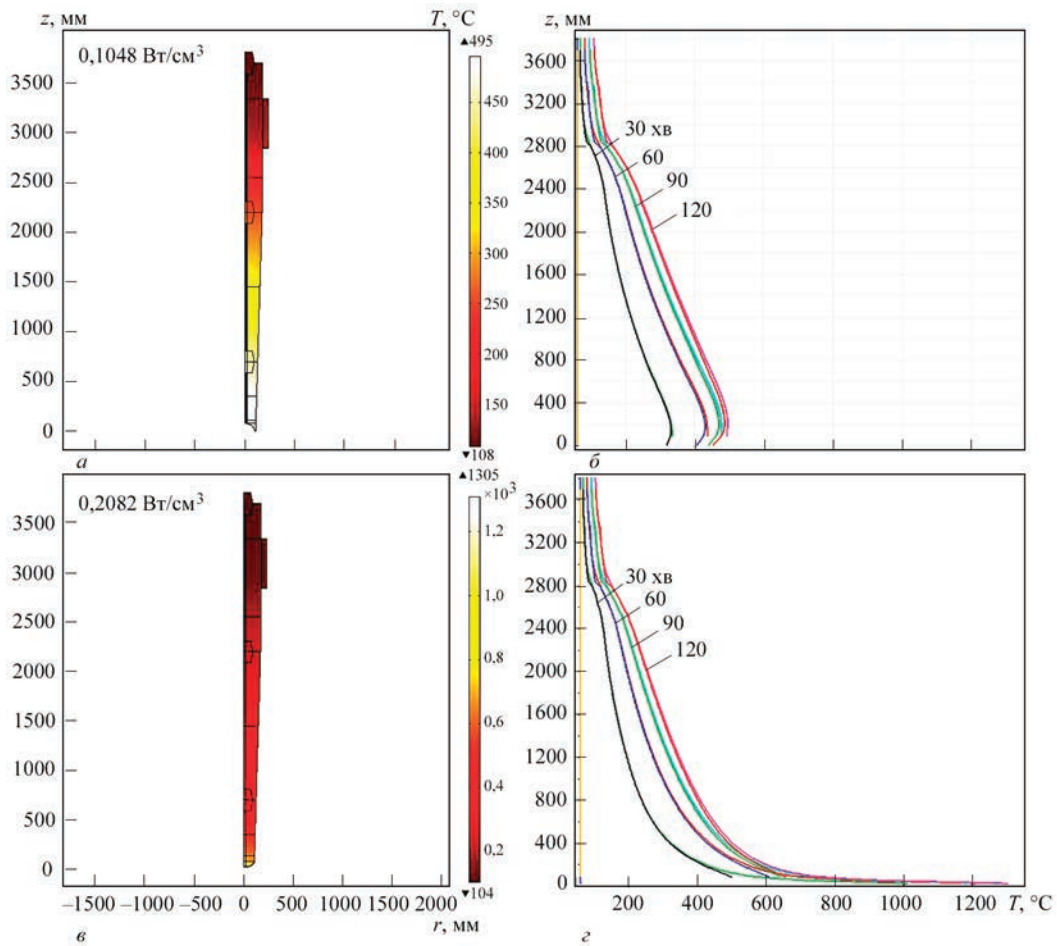


Рис. 2. Температурне поле в гнотовому електроді (а, б) зі складом гнота 11 і монолітному (в, г) при нагріванні струмом 11 кА з 20 °С на відкритому повітрі до усталеної через 2 год температури (а, в) і криві нагріву по висоті (z) електрода (координаті z) по осі симетрії електрода (більші температури) і по поверхні (менші температури) із кроком 30 хв (б, г)

струмопідводу і контактом із розмірами катодної плями, що імітує катод на нижньому торці електрода. При цьому перша гранична умова теплової частини задачі змінена з ізотермічної 1-го роду на однорідну адіабатичну 2-го роду, коли площа контакту із розмірами катодної плями термічно ізолювана і через неї не проходить тепловий потік.

Діаметр наскрізних отворів для заповнення їх гнотами дорівнює, як приклад, 50 мм. Електроди мають таку ж форму, як і електроди в печі, у яких діаметр (215 мм) у нижньому торці менше за початковий діаметр (350 мм) у верхній частині в зв'язку з вигаром електрода. Висота електродної свічки при моделюванні взята 3700 мм, відстань від нижнього торця електрода до склепіння печі і до нижнього торця верхнього струмовідводу має відповідно 2200 і 2840 мм. Висота верхнього струмопідводу — 500 мм. Через електроди для всіх варіантів розрахунку тече струм 11 кА. Діаметри катодних плям для гнотового і монолітного електродів дорівнюють відповідно 210 і 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, який довший час перебуває під дією високих температур печі і в якому відбулися дифузійні процеси між ним і електродом.

Розглядається вісісиметрична задача з осями координат 0, z і 0, r (z — вертикальна вісь в аксіальному напрямку; r — горизонтальна вісь в радіальному напрямку) із графічним представленням на рисунках 1/2 частини розрахункової області від вертикальної осі симетрії.

На рис. 2, а показаний розрахунковий розподіл температурного поля в гнотовому електроді із складом гнота 11 при нагріванні струмом з 20 °С на відкритому повітрі до усталеної через 2 год температури, а на рис. 2, б — криві нагріву по висоті електрода (координаті z) по осі симетрії електрода (більші температури) і по поверхні (менші температури) із кроком 30 хв. Для інших складів гнотів результати мало відрізнялись від отриманих для складу гнота 11.

На рис. 2, в, г показано аналогічний розподіл температурного поля і криві нагріву для монолітного електрода.

Зазначимо, що характерною особливістю гнотового електрода є форма його нижнього торця. Вона має куполоподібну увігнуту форму, що обумовлено наявністю наскрізного отвору з гнотом, а у монолітному електроді — опуклу, оскільки дуга гнотового електрода принципово відрізняється від дуги монолітного геометричними і електричними параметрами. Гнотова дуга розосереджена (її діаметр порівняний з діаметром торця електрода), просторово стійка, еластична, дуже стабільна в широкому діапазоні довжин і електричних режимів, має високу теплову інерційність і меншу температуру, зосереджується практично на одному місці. В монолітному електроді дуга сконцентрована, катодна пляма невелика і вона постійно мігрує по поверхні торця електрода, випалюючи його і легуючі елементи із розплаву. Відповідно цьому струм в районі катодної плями в гнотових електродах проходить відносно рівномірно через збільшену площу катодної плями, його густина близька до густини струму в тілі електрода і нагрівання нижньої частини електрода струмами не таке значне, як у монолітному електроді, в якому струм сконцентрований в невеликій за площею

катодній плямі і нагрівання електрода струмами у цій області суттєве.

Ці особливості характеризують рис. 2, а–г, на яких видно суттєву різницю в температурах електродів (495 і 1305 °С) поблизу катодної плями в їх торцях у випадку відокремлених від печі і дуги електродів. При моделюванні контакт, який імітує катодну пляму є нерухомий і не враховує її переміщення в монолітному електроді, що дає декілька завищені значення температури, але тенденція розподілу температур є цілком прогнозованою. Розраховані усереднені питомі резистивні електричні втрати у всьому об'ємі гнотового електрода (рис. 2, а, б) дорівнюють 0,1048 Вт/см³, а монолітного електрода (рис. 2, в, г) — 0,2082 Вт/см³. Вдвічі більші втрати в монолітному електроді обумовлені концентрацією густини струму у катодній плямі, хоча в самому тілі електрода при даних температурах вони нижчі, ніж в гнотовому електроді, оскільки останні по причині наявності гноту при невисоких температурах мають більший електричний опір.

Із викладеного випливає, що у випадку проходження електричного струму крізь відокремлені від

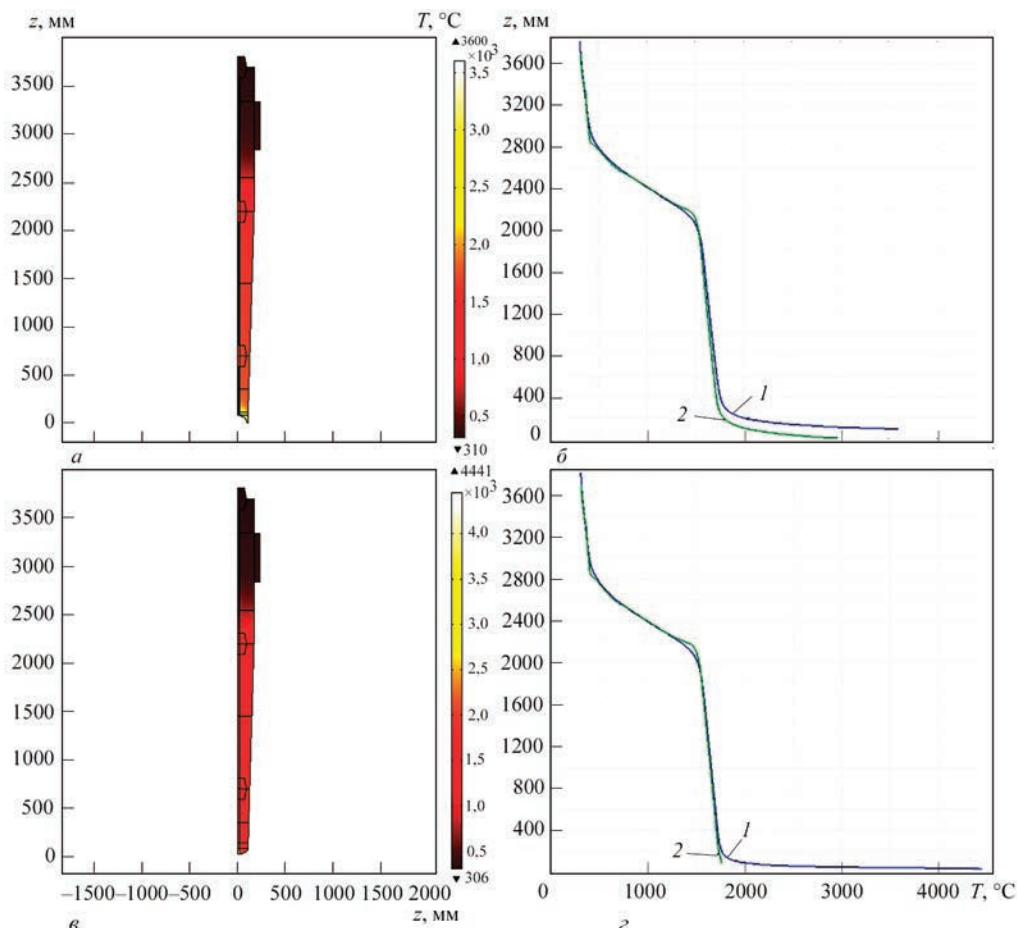


Рис. 3. Температурне поле в гнотовому електроді із складом гнота 11 (а) і монолітному (с) та криві нагріву по висоті електрода (координати z) (б, д): крива 1 — по осі симетрії електрода; крива 2 — по поверхні

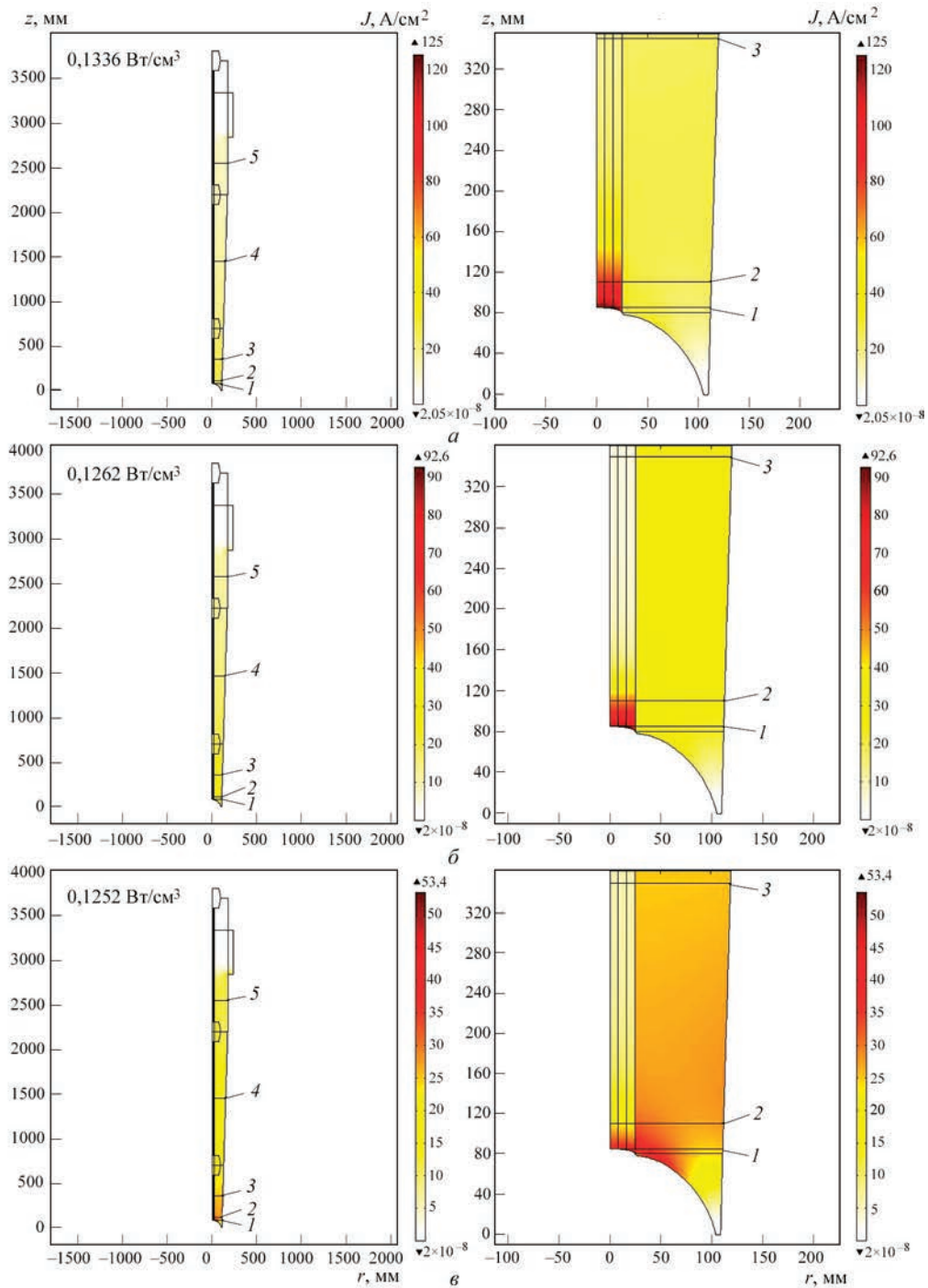


Рис. 4. Розподіл густини струму в електродах із складом гнота: 11 (а); 15 (б); 15' (в)

печі і дуги електроди, які знаходяться на відкритому просторі при атмосферній температурі оточуючого середовища, електричні втрати і температури в гнотових електродах нижче, ніж в монолітних, що дозволяє прогнозувати енергетичну ефективність гнотових електродів вище, ніж монолітних, а також менші витрати матеріалу гнотового електрода на вигорання, а відповідно їх більшу ресурсну ефективність.

Випадок впливу на електрод температур катодної плями дуги, розплаву, пічних газів і стінок печі.

Далі будемо розглядати усталені теплові режими при впливі на електрод зазначених температур.

На рис. 3, а, б представлено розрахункове температурне поле в гнотовому електроді зі складом гнота 11 (а) і криві нагріву по висоті електрода (координаті z) (б), а на рис. 3, в, г — аналогічне температурне поле і криві нагріву для монолітного електрода. Порівнюючи криві нагріву, видно, що в монолітному електроді температури всередині і на поверхні дуже близькі, на відміну від гнотового електрода, в якому до 1900 °С

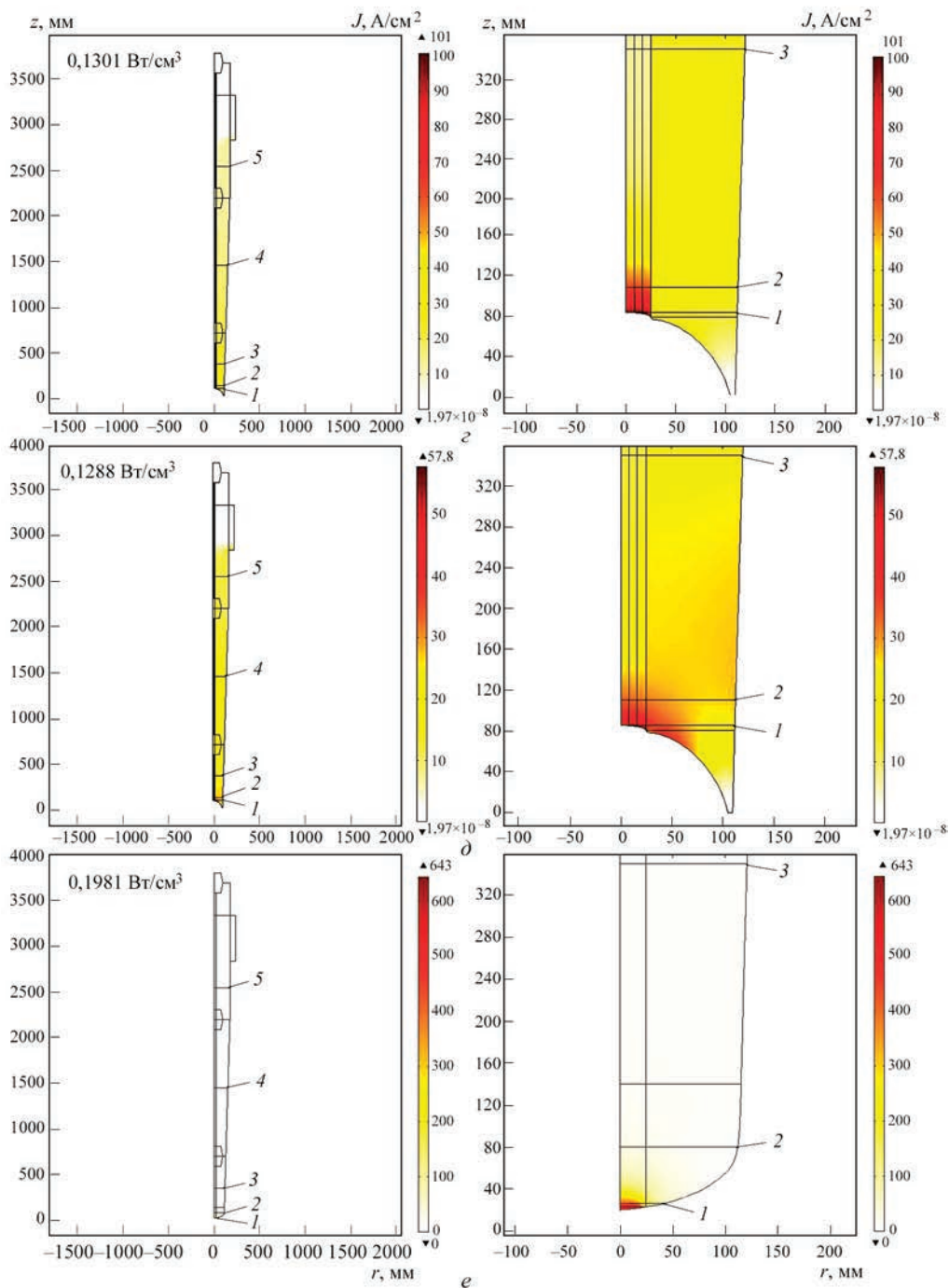


Рис. 4. Розподіл густини струму в електродах із складом гнота: 19 (z); 19' (d); монолітному електроді (e); 1...5 — перерізи

питомий електричний опір складу гнота 11 більший за опір графітованого тіла електрода і тепловиділення в них різняться. За цієї ж причини температура на більшій протяжності гнотового електрода трохи вища із-за більшого тепловиділення при проходженні по електроду струму. Але вище температури 1900 °С питомий електричний опір складу гнота стає меншим за опір графітованого тіла електрода і тепловиділення зменшується. В монолітному електроді високі значення температур концентруються ближче до

невеликої за розміром катодної плями, куди стягуються лінії струму, викликаючи дуже високі значення його густини і інтенсивне нагрівання цієї зони електрода. До того ж суттєвий внесок в рівень температур електродів вносить температура катодних плям дуги. Оскільки катодна пляма в гнотовому електроді за площею близька до площі торця електрода, то і теплові потоки з неї прогрівують торець електрода на більшу глибину. Але температура катодної плями гнотового електрода менша, ніж у монолітного.

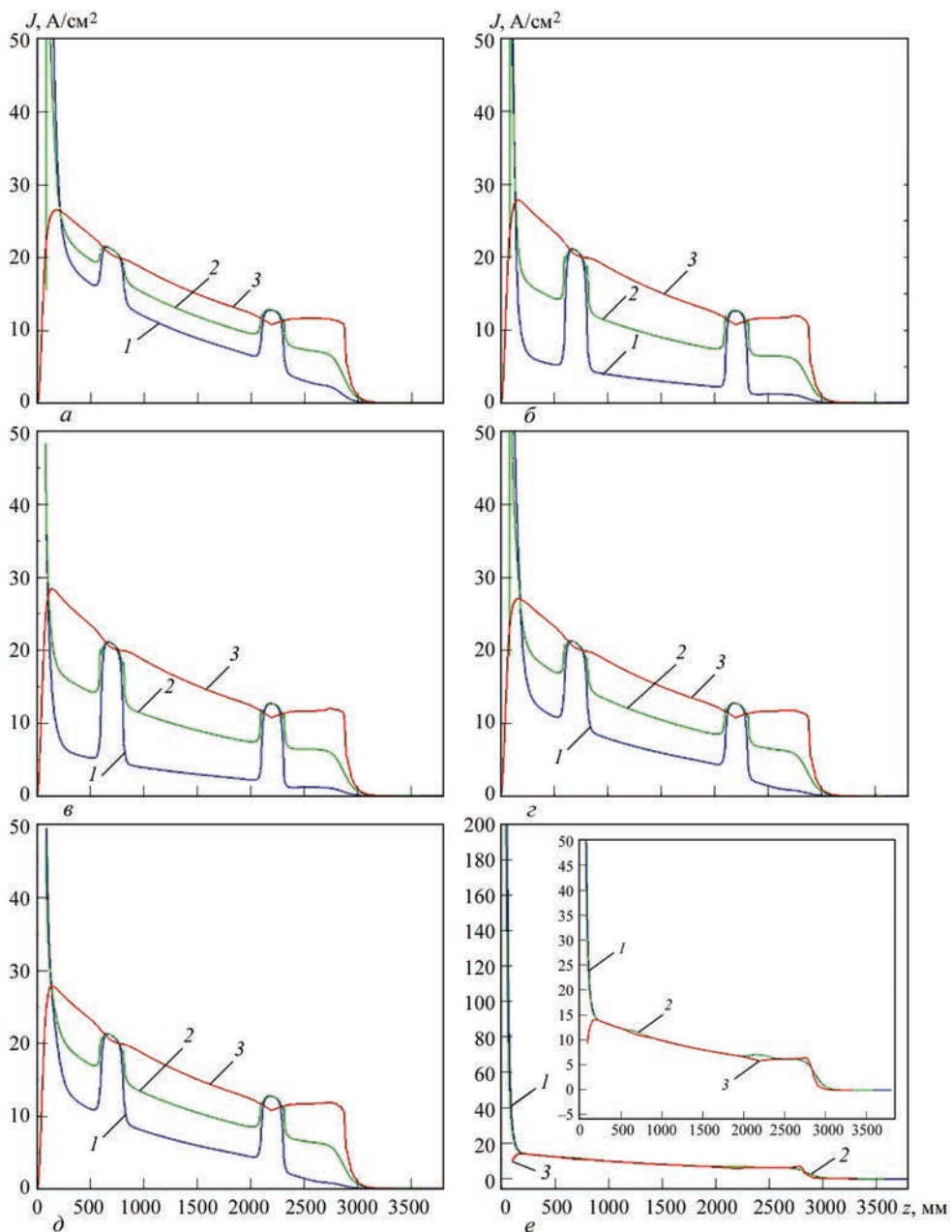


Рис. 5. Криві густини струму по висоті електрода (координаті z): крива 1 — по осі симетрії електрода; крива 2 — границі гнота і тіла електрода; крива 3 — на поверхні електрода в електродах із складом гнота: 11 (а); 15 (б); 15' (в); 19 (г); 19' (д); монолітному електроді (е) (на рисунку праворуч показана збільшена нижня частина графіку)

Розглянемо картину розподілу струму (його густину) в електродах для всіх складів гнотів, питомі електричні опори яких представлені на рис. 1.

На рис. 4 показано розподіл густини струму в гнотових електродах: із складом гнота 11 і усередненими питомими резистивними електричними втратами в електроді $0,1336 \text{ Вт/см}^3$ (а); із складом гнота 15 і втратами $0,1262 \text{ Вт/см}^3$ (б); із складом гнота 15' і втратами $0,1252 \text{ Вт/см}^3$ (в); із складом гнота 19 і втратами $0,1301 \text{ Вт/см}^3$ (г); із складом гнота 19' і втратами $0,1288 \text{ Вт/см}^3$ (д); монолітному електроді і втратами $0,1981 \text{ Вт/см}^3$ (е). Видно, що розподіл густини струму в електродах корелюється із їх питомими електричними опорами при

різних температурах (рис. 1). На ділянках з більшими значеннями опорів гнотів густина струму в них менша ніж в графітованому тілі самого електрода на прилеглих ділянках і навпаки. Найбільша густина струму спостерігається поблизу катодної плями монолітного електрода, що обумовлює високу температуру в цій зоні і її підвищений торцевий вгар. Усереднені питомі резистивні електричні втрати в гнотових електродах менші, ніж у монолітному електроді на 32...37%. Оскільки електричні втрати пропорційні струму в квадраті, то можна прогнозувати, що на 5,7...6,1% можливо підвищити струмове навантаження в гнотових електродах в процесі плавлення до зрівняння

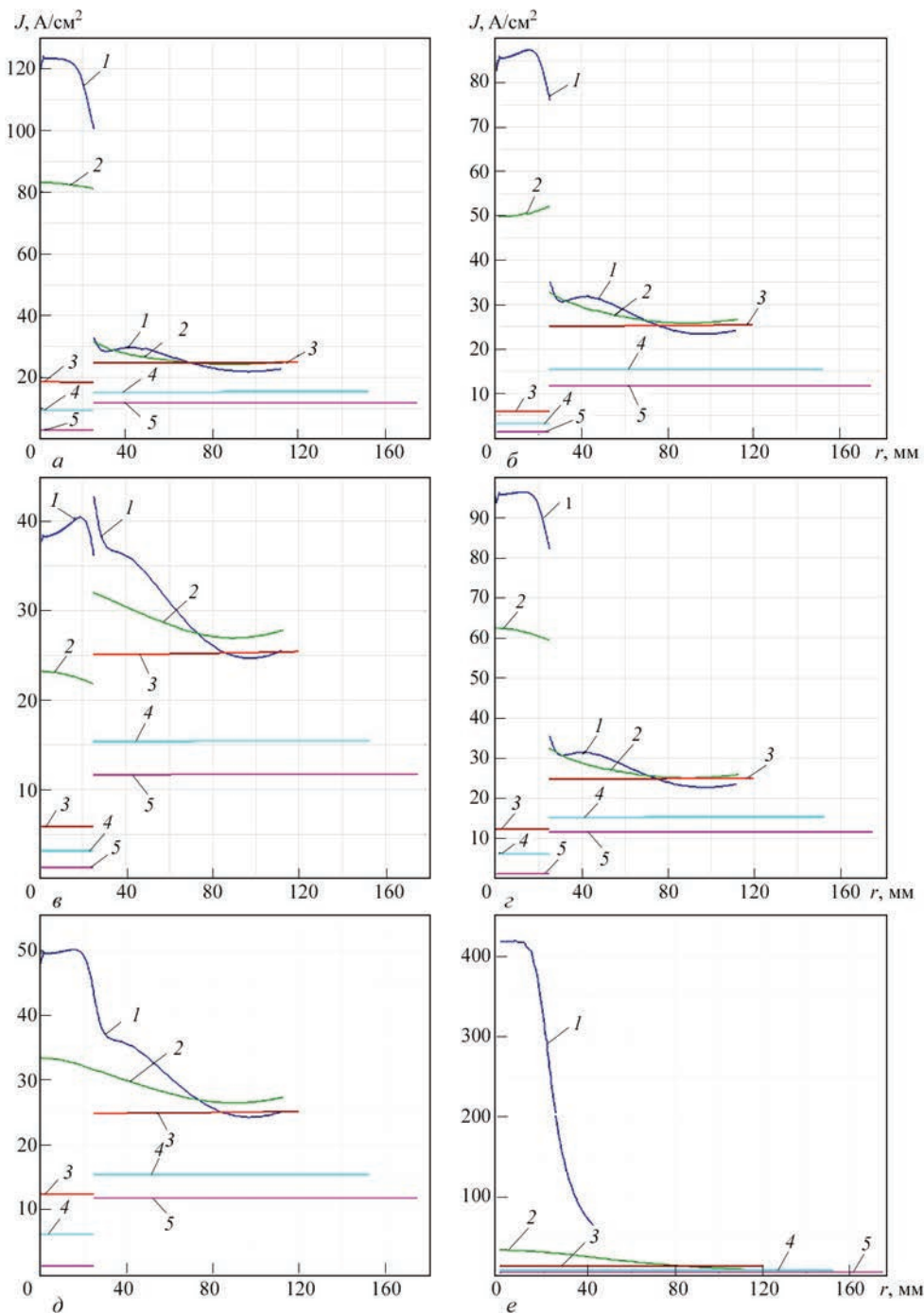


Рис. 6. Криві густини струму в радіальному напрямі (координаті r) на різній висоті (перерізи 1...5 див. рис. 4) в електродах із складом гнота: 11 (а); 15 (б); 15' (в); 19 (г); 19' (д); монолітному електроді (е)

електричних втрат в гнотових і монолітних електродах, що підвищить продуктивність плавлення сталі і економію електричної енергії.

На рис. 5 наведено криві густини струму по висоті електрода (координаті z): по осі симетрії електрода — крива 1; на границі гнота і тіла електрода — крива 2; на поверхні електрода — крива 3 в електродах із складом гнота: 11 (а); 15 (б); 15' (в); 19 (г); 19' (д); монолітному електроді (е). Горби на кривих співпадають з ділянками розташування ніпелів.

На рис. 6 представлені криві густини струму в радіальному напрямку (координаті r) на різній висоті (перерізи 1...5, див. рис. 4) в електродах із складом гнота: 11 (а); 15 (б); 15' (в); 19 (г); 19' (д); монолітному електроді (е). Розриви кривих на рис. 6 в гнотових електродах відображають границі сполучення гнота і електрода, у яких різні значення питомих електричних опорів.

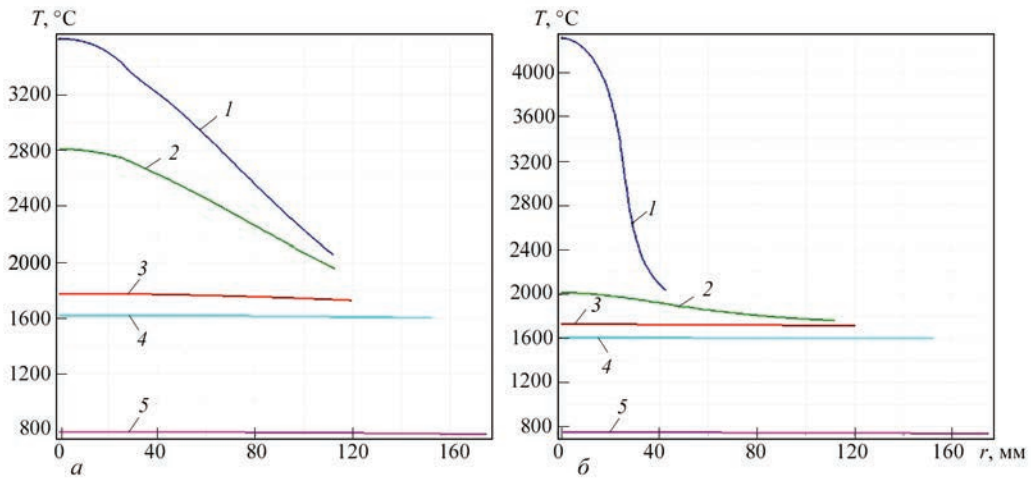


Рис. 7. Криві температур в радіальному напрямі (координати r) на різній висоті (перерізи 1...5 див. рис. 4): гнотових електродів (а); монолітного електрода (б)

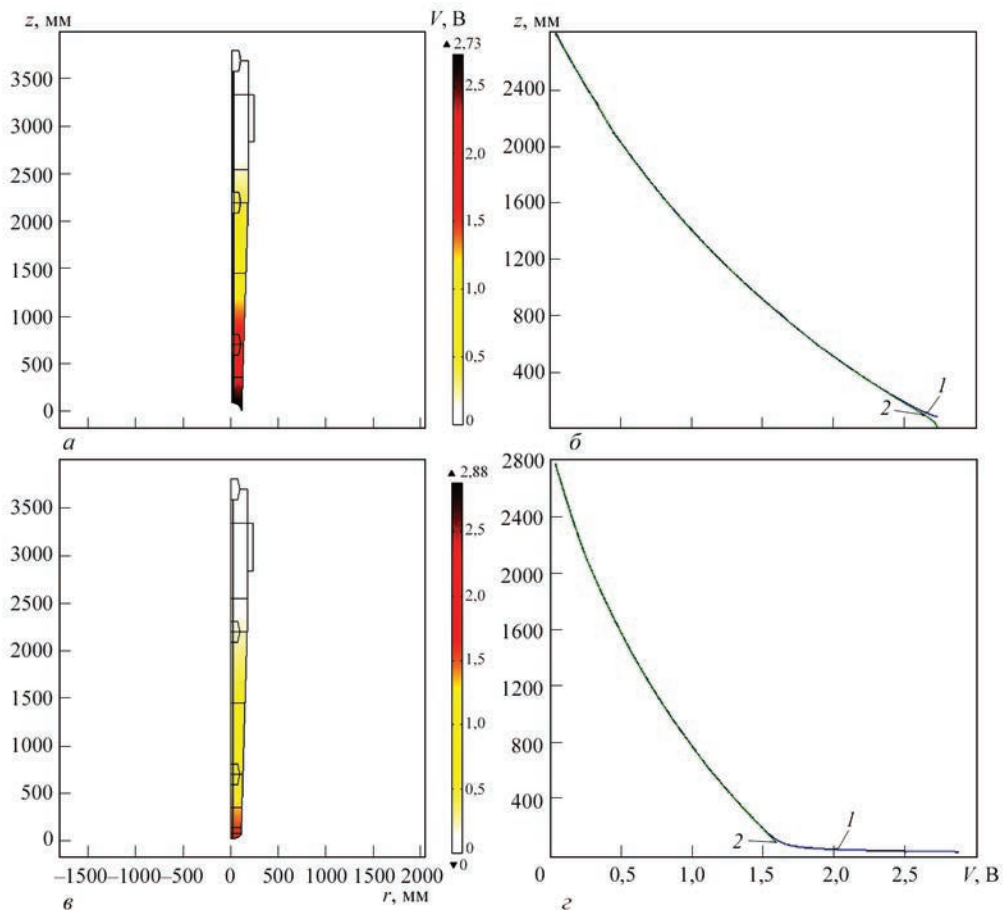


Рис. 8. Розподіл електричного потенціалу (V) в тілі електрода (ліворуч) і по його висоті (праворуч) гнотових електродів (а, б) і монолітних (в, г): крива 1 відповідає осі симетрії електрода, крива 2 — поверхні електрода

Розподіл густини струму в електродах на рис. 5 і 6 також корелюється із значеннями їх питомих електричних опорів при різних температурах (рис. 1).

На рис. 8 наведено розподіл електричного потенціалу в електроді (на рис. ліворуч) і по його висоті (праворуч) гнотових (а, б) і монолітних (в, г) електродів (крива 1 відповідає осі симетрії електрода, крива 2 — поверхні електрода). Цей показ-

ник для різних типів розглянутих складів гнотів електродів змінюється мало, тому рисунки надані для одного складу гнота 11. Електричний потенціал в гнотових електродах вище, ніж в монолітному електроді, у зв'язку із тим, що електричний опір розглянутих складів гнота при температурах до 1900...2500 °С більший за опір монолітного електрода. Однак високі концентрації густини струму

у катодній плямі в монолітних електродах призводять і до більших електричних втрат в них.

Подальші дослідження повинні стосуватися удосконаленню математичної моделі із меншою кількістю спрощень і припущень, а також побудові математичної моделі і здійсненню розрахунків при роботі трьох електродів трифазної печі змінного струму.

Висновки

1. Розроблена математична модель для чисельного оціночного розрахунку електричних і теплових процесів в графітованих гнотових (композитних) і монолітних електродах ДСП постійного струму при введенні ряду спрощень і припущень. Модель дозволяє визначати основні закономірності процесів, розглядати розподіл температурних полів, електричного потенціалу і густини струму в електроді, його можливі концентрації, будувати графіки залежності визначених характеристик від ряду параметрів і складу гнотів із різним співвідношенням між їх питомими електричними опорами і опорами електрода. Це надає можливість прогнозувати роботу електродів при застосуванні в дугових печах.

2. В гнотовому електроді дуга розосереджена (її діаметр порівняний з діаметром торця електрода), просторово стійка, еластична, дуже стабільна в широкому діапазоні довжин і електричних режимів, має високу теплову інерційність і меншу температуру, зосереджується практично на одному місці. В монолітному електроді дуга сконцентрована, катодна пляма невелика і вона постійно мігрує по поверхні торця електрода, випалюючи його і легуючі елементи із розплаву. Відповідно цьому показано, що струм в районі катодної плями в гнотових електродах проходить відносно рівномірно через збільшену площу катодної плями, його густина близька до густини струму в тілі електрода і нагрівання його нижньої частини струмами не таке значне, як у монолітному електроді, в якому струм сконцентрований в невеликій за площею катодній плямі і нагрівання електрода струмами у цій області суттєве.

3. У випадку проходження електричного струму крізь відокремлені від печі і дуги електроди, які знаходяться на відкритому просторі при атмосферній температурі оточуючого середовища, електричні втрати і температури в гнотових електродах нижче, ніж у монолітних, що дозволяє прогнозувати енергетичну ефективність гнотових електродів вищу, ніж монолітних, а також менші витрати матеріалу гнотового електрода на вигорання, а відповідно їх більшу ресурсну ефективність. Температура торцевої частини гнотових електродів склала $495\text{ }^{\circ}\text{C}$, монолітного — $1305\text{ }^{\circ}\text{C}$. Усереднені питомі резистивні електричні втра-

ти у всьому об'ємі електродів при тих же умовах (поза піччю) і струмі 11 кА дорівнюють: для дослідженого гнотового електрода — $0,105\text{ Вт/см}^3$; монолітного $0,208\text{ Вт/см}^3$. Двічі більші втрати в монолітному електроді обумовлені концентрацією густини струму у катодній плямі, хоча в самому тілі електрода при даних температурах вони нижчі, ніж в гнотовому електроді, оскільки останні по причині наявності гнота мають більший електричний опір при невисоких температурах.

4. При впливі на електрод температур катодної плями дуги, розплаву, пічних газів і стінок печі розраховані усереднені питомі резистивні електричні втрати в досліджених гнотових електродах лежать в діапазоні $0,125\dots 0,134\text{ Вт/см}^3$ і вони менші, ніж у монолітного електрода ($0,198\text{ Вт/см}^3$) на $32\dots 37\%$. Можна прогнозувати, що струмове навантаження в гнотових електродах в процесі плавлення можливо підвищити на $5,7\dots 6,1\%$ до зрівняння електричних втрат в гнотових і монолітних електродах, що підвищить продуктивність плавлення сталі і дасть економію електричної енергії.

5. Для більшості типів гнотових електродів значення електричного опору гнота при температурах до $1900\dots 2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ більше за опір графітованого тіла електрода. Відповідно опір ділянки гнотових електродів при цих температурах перевищує опір такої ж ділянки монолітного електрода. Із зростанням температури вище зазначеного діапазону електричний опір більшості типів гнотів стає меншим за опір графітованого тіла електрода і опір гнотових електродів на такій ділянці стає меншим за опір аналогічної ділянки монолітного електрода.

6. За результатами проведеного оціночного розрахунку із прийнятими в математичній моделі спрощеннями і допущеннями можна зробити попередній висновок, що гнотові електроди мають менші електричні втрати, температуру у робочого торця електрода, порівнюючи їх із монолітними електродами, що робить перші більш енерго- і ресурсоефективними. Це підтверджується і на практиці при роботі дугових сталеплавильних печей постійного струму із такого типу електродами.

Список літератури

1. Патон Б.Е., Лакомский В.И., Галинич В.И., Мищенко Д.Д. (2011) Фитильные электроды электродуговых печей. *Черные металлы*, **5**, 13–15.
2. Богаченко А.Г., Мищенко Д.Д., Брагинец В.И. и др. (2016) Экономия электроэнергии на дуговых сталеплавильных печах постоянного тока с графитированными фитильными электродами. *Современная электрометаллургия*, **1**, 58–64. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2016.01.09>
3. Патон Б.Е., Богаченко О.Г., Кійко С.Г. та ін. (2021) Досвід застосування графітованих гнотових електродів на промисловій дуговій сталеплавильній печі змінного струму.

Сучасна електрометалургія, **1**, 48–53. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2021.01.06>

4. Пашацкий Н.В., Молчанов Е.А. (1998) Тепловое состояние электродов дуговых печей. *Изв. вузов. Черная металлургия*, **5**, 24–26.
5. Кожухов А.А., Мерекер Э.Э., Сазонов А.В. (2008) К вопросу о распределении температур в электродах дуговой сталеплавильной печи. *Изв. вузов. Черная металлургия*, **9**, 7–10.
6. Мохов В.А., Ячиков В.М. (2012) Моделирование теплового состояния графитированного электрода дуговой печи с учетом испарительного охлаждения. *Электрометаллургия*, **11**, 35–41.
7. Крикент И.В., Кривцун И.В., Демченко В.Ф., Пиптюк В.П. (2013) Численное моделирование сильноточного дугового разряда в установке ковш–печь постоянного тока. *Современная электрометаллургия*, **3**, 45–50.
8. Лакомский В.И. (1997) *Оксидные катоды электрической дуги*. Запорожье, Изд-во фирмы «Интернал».

References

1. 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].
2. 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. *Sovrem. Elektrometall.*, **1**, 58–64 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2016.01.09>
3. Paton, B.E., Bogachenko, O.G., Kyiko, S.G. et al. (2021) Experience of application of graphitized wick electrodes in industrial steel-making AC furnace. *Suchasna Elektrometall.*, **1**, 48–53 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2021.01.06>
4. Pashatsky, N.V., Molchanov, E.A. (1998) Thermal state of electrodes of arc furnaces. *Izv. Vuzov. Chyorn. Metallurgiya*, **5**, 24–26 [in Russian].
5. 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].
6. 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].
7. Krikent, I.V., Krivtsun I.V., Demchenko, V.F. et al. (2013) Numerical modeling of high-current arc discharge in DC ladle-furnace unit. *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 45–50.
8. Lakomsky, V.I. (1997) *Oxide cathodes of electric arc*. Zaporozhie, Izd-vo Internal [in Russian].

MATHEMATICAL MODELING OF ELECTRIC AND THERMAL PROCESSES IN GRAPHITIZED WICK ELECTRODES FOR DC ARC STEELMAKING FURNACES

S.V. Rymar, O.G. Bogachenko, I.O. Honcharov, I.O. Neilo, H.V. Kuzmenko, R.S. Hubatyuk
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

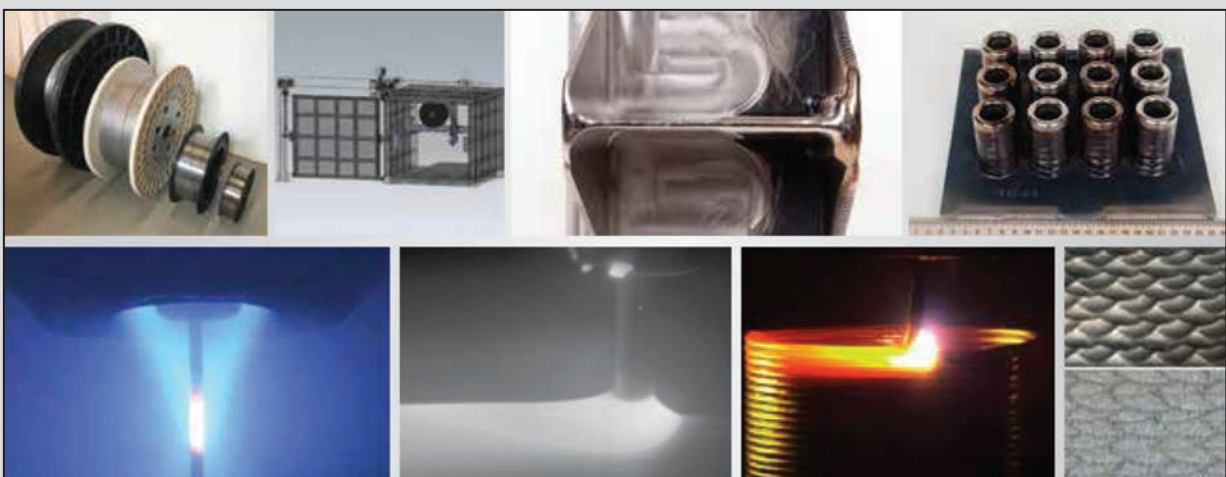
11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: stement@ukr.net

The paper presents the results of mathematical modeling of electric and thermal processes in graphitized wick (composite) and monolithic electrodes for DC steelmaking furnaces. Calculations were performed using the developed mathematical model based on the finite element method with introduction of a number of simplifications and assumptions. The model allows determination of the regularity of electric and thermal processes running in the electrodes. Distribution of current density, electric potential and temperature in composite electrodes was studied at application of different wick compositions with different ratios of their specific electric resistances and electrode resistances, which enables prediction of their performance at application in arc furnaces. Results of estimated calculations showed that wick electrodes have lower electric losses and their heating temperature than monolithic electrodes, making them more energy and resource efficient. 8 Ref., 8 Fig.

Keywords: composite (wick) electrodes, monolithic electrodes, current density distribution, electric potential distribution, temperature distribution, influence of wick composition, energy efficiency, resource efficiency

Надійшла до редакції 03.07.2023

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИЙ 3D ДРУК МЕТАЛЕВИМ ДРОТОМ



<https://xbeam3d.com/>