

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ДИФУЗІЇ ТА ЇХ ВПЛИВУ НА ПИТОМИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ ОПІР ГРАФІТОВАНИХ ГНТОВИХ ЕЛЕКТРОДІВ, ЗАСТОСОВУВАНИХ В ПРОМИСЛОВИХ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧАХ

О.Г. Богаченко¹, Д.Д. Міщенко¹, І.О. Гончаров¹, І.О. Нейло¹,
С.Г. Кійко², І.М. Логозинський², К.М. Горбань², О.Г. Федьков²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: stemet@ukr.net

²ПрАТ «Дніпроспецсталь». 69000, м. Запоріжжя, вул. Південне Шоце, 81. E-mail: info@dss.com.ua

Зазначено, що при застосуванні композитних (гнотових) графітованих електродів на промислових дугових сталеплавильних печах в системі гніт–електрод відбуваються процеси дифузії, які визначають властивості графітованого гнотового електрода і власне самого гноту, а також параметри електричної дуги. Проведено дослідження процесів дифузії і їх впливу на питомий електричний опір тіла графітованого гнотового електрода марки ЕГ з вихідним діаметром 350 мм, який пройшов повний цикл нагріву на печі ДСП ПС-12 з наступним охолодженням до температури навколишнього середовища і витримкою $1,2 \cdot 10^5$ год. Встановлено, що в системі гніт–електрод має місце активна дифузія всіх основних компонентів гноту (К, Ва, Сu, Cr, Ti) в тіло електрода. При цьому, чим більше у зразку міді, барію, титану і інших компонентів гноту, тим менший його питомий електричний опір і навпаки. Завдяки дифузії компонентів гноту в системі гніт–електрод питомий електричний опір гнотового електрода на 35...40 % нижче, ніж питомий електричний опір вихідного монолітного електрода. Бібліогр. 8, табл. 3, рис. 5.

Ключові слова: дугові сталеплавильні печі, графітований гнотовий електрод, дифузія, питомий електричний опір

Вступ. У роботах [1–4] було показано, що застосування композитних (гнотових) графітованих електродів на дугових сталеплавильних печах постійного і змінного струму значно поліпшує, практично, всі техніко-економічні показники роботи цих печей. Взаємозв'язок основних технологічних параметрів, техніко-економічних показників плавки та вплив на них гнотових електродів показано на рис. 1. Гнотові електроди мають, перш за все, високу стабільність електричної дуги. Вони забезпечують зниження витрат електродів, в середньому до 18 %, зниження витрати електроенергії до 30 %, збільшення продуктивності печі до 25 %, зниження вмісту азоту в сталі до 19 %. Гнотові електроди також забезпечують зниження рівня шуму працюючої печі на 8...10 % і викиду пилу і газів до 15 %. У цих роботах показано, також, що ефективність застосування гнотових електродів однаково висока як у печах постійного (ДСП ПС), так і в печах змінного струму (ДСП). Вона не залежить від ємності печі, її конструкції, від розмірів графітованих електродів і визначається видом і якістю шихти, електричним режимом, складом гнотів, якістю вихідних графітованих електродів та ін. Основна ідея застосування гнотових графітованих електродів в дугових сталеплавильних

печах полягає в тому, щоб створити в прикатодній області графітованого електрода сприятливі термодинамічні умови для іонізації газів у стовпці дуги. Для цього до складу гноту вводять матеріали, що мають високу термічну стійкість (як правило, на основі графіту), матеріали, що регулюють електропровідність гноту (наприклад, мідь і циркон) та компоненти, що містять елементи з низькою роботою виходу електронів (наприклад, елементи I та II групи таблиці Менделєєва) та ін.

Особливістю виробництва та експлуатації гнотових електродів є те, що після набивання його гнотовою сумішшю він не піддається будь-якій термічній обробці, тобто електрод встановлюється на піч із сирим гнотом. Крім цього, гніт і електрод не ізольовані один від одного. Тому всі процеси (коксування сполучного, випаровування летючих та вологи, формування структури і властивостей, всі складні фізико-хімічні процеси) проходять при нагріванні електрода від температури оточуючого середовища до температур робочого торця електрода, порядку 3900...4000 °С. І тут дуже важливе значення мають процеси дифузії в системі гніт–електрод, що істотно впливають на формування енергетичних і механічних властивостей всього гнотового електрода та параметрів потужнострумкової електричної дуги.

© О.Г. Богаченко — <https://orcid.org/0000-0002-3306-6626>, Д.Д. Міщенко — <https://orcid.org/0000-0003-3612-1819>,
І.О. Гончаров — <https://orcid.org/0000-0003-2915-0435>, І.О. Нейло — <https://orcid.org/0009-0003-4771-3630>,
С.Г. Кійко — <https://orcid.org/0000-0002-1161-5866>

© О.Г. Богаченко, Д.Д. Міщенко, І.О. Гончаров, І.О. Нейло, С.Г. Кійко, І.М. Логозинський, К.М. Горбань, О.Г. Федьков, 2025

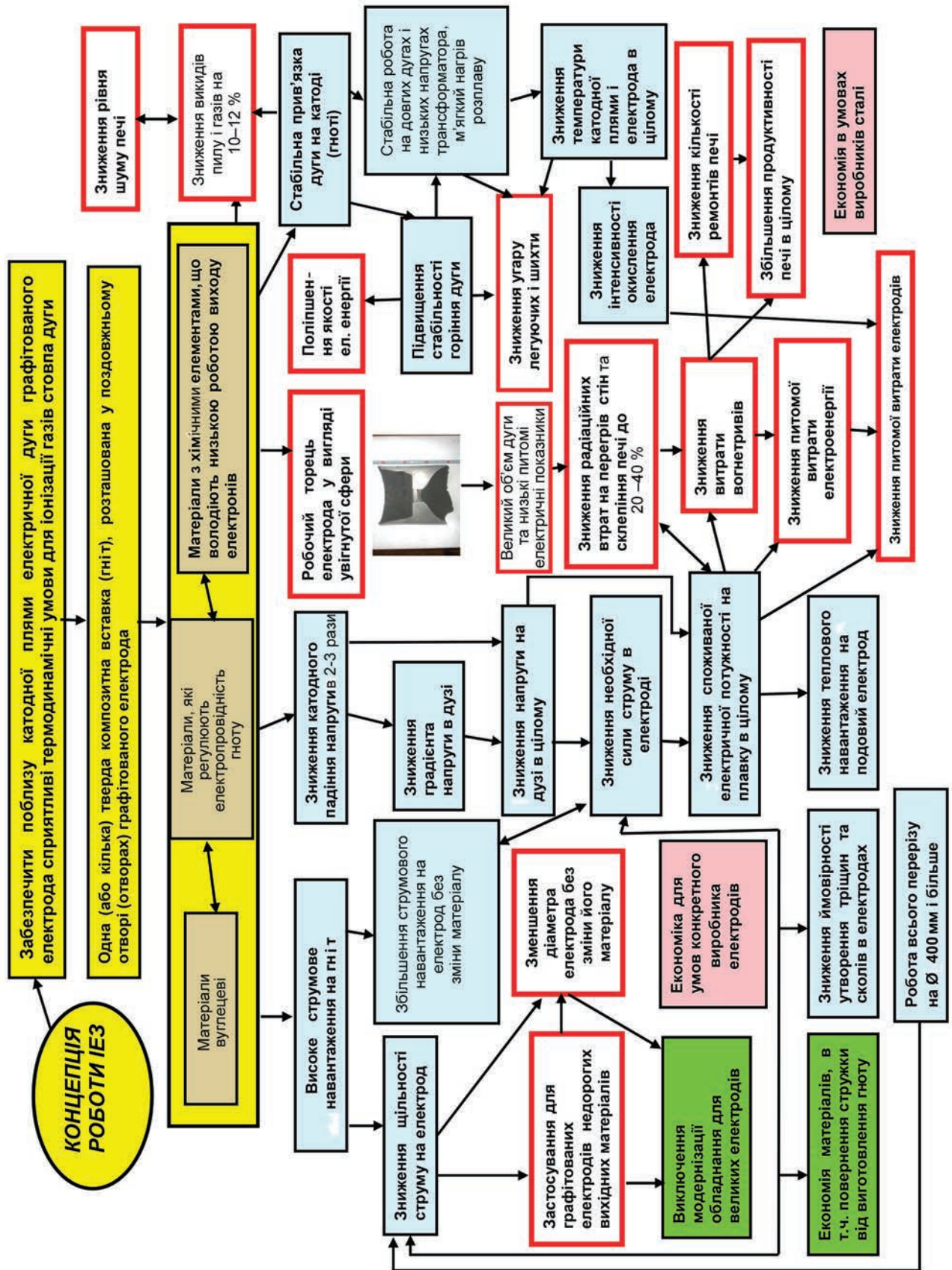


Рис. 1. Взаємозв'язок основних технологічних параметрів і техніко-економічних показників плавки з використанням гнотових електродів на ДСП і ДСП ПС

Останнім часом у світовій електрометалургії широко застосовуються технології, що передбачають швидкісну плавку сталі-напівпродукту з подаль-

шим його доведенням у спеціальних печах-ковшак і вакууматорах, конверторах ГКР. Виплавка сталі-напівпродукту ведеться у печах змінного або постій-

Таблиця 1. Деякі властивості нафтового коксу

Переважаюча структура	Пікнометрична щільність, кг/м ³	Коефіцієнт лінійного термічного розширення*, 10 ⁻⁶ /°C	Ступінь анізотропії	Масова частка, %		
				Золи	Сірки	Ванадію
Ізотропна	2000...2080	14...20	1,3	0,2...0,3	0,3...1,7	0,007...0,009
Мозаїчна	2080...2120	4...5	1,75	0,15...0,25	0,5...1,7	0,003...0,004
Голчаста	2130...2150	3,0...0,5	2,0	0,005...0,150	0,2...0,8	<0,001

*У напрямку кращої орієнтації вуглецевих шарів в інтервалі від 20 до 400 °С.

ного струму ємністю 150...200 т, які мають джерела живлення, в яких 1 кВА встановленої потужності, орієнтовно, дорівнює 1 кг використаної шихти. Такі печі забезпечуються графітованими електродами з великими та граничними діаметрами 650...750 мм і навіть 810 мм, які здатні витримувати струмове навантаження 100...130 кА при щільності струму до 30...35 А/см². Природно, що до таких електродів висуваються дуже високі вимоги. Вони повинні витримувати вказані потужнострумове навантаження, їх питомий електричний опір (ПЕО) має бути на рівні 5...7 мкОм·м. Вони повинні мати високу механічну міцність, високу стійкість проти утворення тріщин, сколів і руйнувань та ін., що забезпечує їх високу експлуатаційну надійність. Для виготовлення таких електродів використовують дорогий нафтовий голковий кокс і унікальне технологічне обладнання. Деякі властивості нафтового голкового коксу представлено в табл. 1.

В даний час виробники електродів використовують багато технологічних прийомів, що підвищують якість таких електродів, зокрема, зниження рівня окиснення бічної поверхні електрода. Наприклад, електролітичні осадження міді на поверхню електрода. Показано [5], що зі збільшенням глибини осадженої міді в тіло електрода до 700 мк його ПЕО знижується від 13 до 0,4 мкОм·м. Застосування міді дозволяє знизити питому витрату електроенергії в ніпельному з'єднанні та в контакті електрод–електродоутримувач на 12...20 %. Відомі способи захисту бічної поверхні електрода просоченням водним розчином поліфосфату натрію з концентрацією 18...20 % і малеїнової кислоти при 90...100 °С. Ефективно застосовують також нітритно-борофосфатну композицію. Розчин наносять зануренням пульверизатором чи пензлем. До недоліків слід віднести складність як у приготуванні складу, так і нанесення покриття на поверхню електрода. Це призводить до втрати продуктивності печі. Відомі також способи, що передбачають нанесення покриття з максимально можливим вмістом карбідоутворюючих металів [6]. Загальним для всіх зазначених способів є те,

що захисні матеріали наносяться ззовні електрода та захисні шари мають невелику товщину, що обчислюється кількома міліметрами. При вході такого електрода в пічний простір має місце швидке його нагрівання та активна взаємодія з високотемпературними пічними газами. Тому захисний шар швидко окиснюється, сублимує і ефект попередньої обробки електрода знижується. Середньостатистичні показники по стійкості електродів на печах ДСП старої конструкції та сучасних надпотужних ДСП за видами витрат наведені у табл. 2. Зараз промислові електроди за якісними показниками поділяють на чотири групи, у міру збільшення якісних показників: ЕГ, ЕГС, ЕГП, ЕГСП (RP, HP, SHP, UHP за міжнародною класифікацією).

З табл. 2 видно, що застосування нафтового голкового коксу і різного виду обробки зовнішньої поверхні електродів на сучасних ДСП дають відчутний ефект зі зниження швидкості окислення бічної поверхні великогабаритних електродів і основною статтею витрат таких електродів є торцевий знос.

Завдяки цим матеріалам та технологіям виробництва вдалося збільшити щільність струму у великогабаритних електродах (діаметром 500...750 мм) до 35,7...33,3 А/см², що забезпечило стійку роботу надпотужних ДСП з масою садки 150...180 т, печей-ковшів, вакууматорів та ін. Одночасне вдосконалення технології виплавки сталі та виробництва високоякісних електродів сприяли стабільному зниженню питомої витрати електродів. Так, в Японії ще в кінці 90-х років минулого століття цей показник знизився до 2,5...3,0 кг на одну тонну сталі. В умовах вітчизняних металургійних заводів цей показник

Таблиця 2. Середньостатистична витрата графітованих електродів за видами витрат на дугових печах старої конструкції і надпотужних ДСП

Вид витрат	Розмір витрат, %	
	В ДСП старої конструкції, до 50 т	В надпотужних ДСП
Бічна поверхня	55...75	40
Ерозія торців	15...50	50
Тріщини, сколи	10...20	10

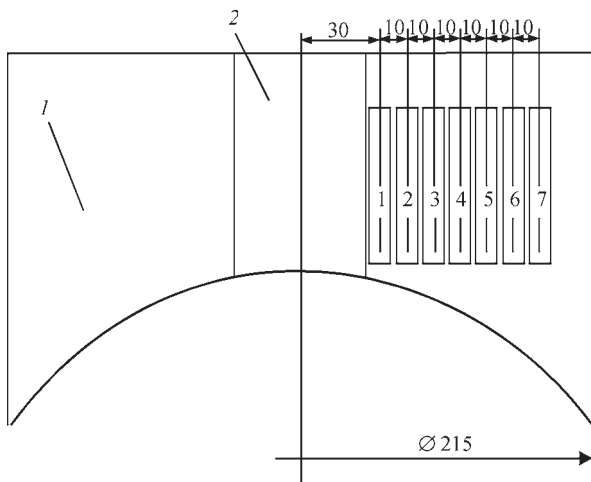


Рис. 2. Схема відбору зразків з недогарку промислового електрода з вихідним діаметром 350 мм на печі ДСП ПС-12: 1 — електрод; 2 — гніт

досі тримається на рівні 6...7 кг/т. Тому зниження питомої витрати електродів є однією із найважливіших задач сталеплавильників.

Дослідження та обговорення результатів.

Принципово нові можливості у частині покращення якості графітованих електродів відкривають сталеплавильникам гнотові електроди. Гнотовий графітований електрод отримують шляхом формування (свердління) в монолітному (звичайному) електроді одного або декількох вертикальних отворів, які набиваються попередньо приготовленою сумішшю відповідних компонентів. До складу суміші входять тугоплавкі та електропровідні компоненти, елементи I та II груп таблиці Менделєєва та ін. (рис. 1), що забезпечує принципово нові геометричні та енергетичні показники потужнострумової дуги, що має місце при плавці в дуговій сталеплавильній печі. Важливо те, як зазначалося, що надалі гнотовий електрод в сирому вигляді встановлюють на піч, і в процесі його нагріву в системі гніт–електрод проходять різні фізико-хімічні активні дифузійні процеси. Деякі дослідження процесів дифузії і їх впливу на питомий електричний опір графітованих гнотових електродів було метою даної ро-

боти. Це було вперше показано в роботі [7]. Для більш детального дослідження процесів дифузії і їх впливу на ПЕО тіла електрода було відібрано сім вертикальних зразків (рис. 2) від недогарка електрода марки ЕГ з вихідним діаметром 350 мм, який пройшов повний цикл нагріву на печі ДСП ПС-12 з наступним охолодженням до температури навколишнього середовища і витримкою $1,2 \cdot 10^5$ год. На плавці застосовували гніт складу F_0 . Його вихідний хімічний склад і склад після нагріву та охолодження наведено в табл. 3.

Результати досліджень представлені на рис. 3 і 4. Із цих рисунків випливає наступне: в системі гніт–електрод має місце активна дифузія всіх основних компонентів гноту (К, Ва, Cu, Cr, Ti, O_2) в тіло електрода; компоненти гноту розподілені досить рівномірно по всьому перерізу електрода; в системі гніт–електрод не відбувається повної дифузії компонентів, мабуть цьому перешкоджає границя розділу між гнотом і тілом електрода; питомий електроопір зразків (див. стовпчики на рис. 3) дуже чутливий до хімічного складу зразка. При цьому, чим більше у зразку міді, барію, титану і інших компонентів гноту, тим менший його питомий електроопір і навпаки (наприклад, зразки 4 і 3 (рис. 3) і зразок 4 (рис. 4)).

Про високу ефективність дифузії компонентів гноту в тіло електрода говорить також те, що питомий електричний опір гнотового електрода зразків на 35...40 % нижче, ніж у тіла монолітного електрода (рис. 4).

У зазначеному діапазоні температур компоненти гноту утворюють прості і складні оксиди, нітриди, бориди, карбіди. При цьому утворюються міжшарові сполуки (МШС), зокрема KC_8 , KC_{24} , KC_{36} , BaC_6 , CaC_3 та ін., які мають електропровідність вище, ніж графіт по осі *a* (вздовж вуглецевих шарів) у 10 разів, по осі *c* (перпендикулярно до вуглецевих шарів) у 200 разів [8]. Ці сполуки за високих температур мають, як правило, нестехіометричний склад і, отже, яскраво виражені властивості напівп-

Таблиця 3. Вихідний хімічний склад гноту F_0 та його склад після нагріву і охолодження до температури навколишнього середовища і витримки $1,2 \cdot 10^5$ год

Компонент	C	Багатоцільова вуглецева паста (МУП)	Cu	$K_2Cr_2O_7$	$Ba_3(PO_4)_2$	Ti
Вихідний вміст компонентів в гноті, %	28,2	37,5	15,6	6,2 K–2,06 Cr–2,74	3,2 Ba–2,2	9,4
Вміст* компонентів в гноті після нагріву і охолодження, %	–	–	4,16/1,13	K–0,21/0,37 Cr–0,28/0,4	Ba–1,48/1,26	1,04/1,16

*У чисельнику — по осі гнота; у знаменнику — на краю гнота.

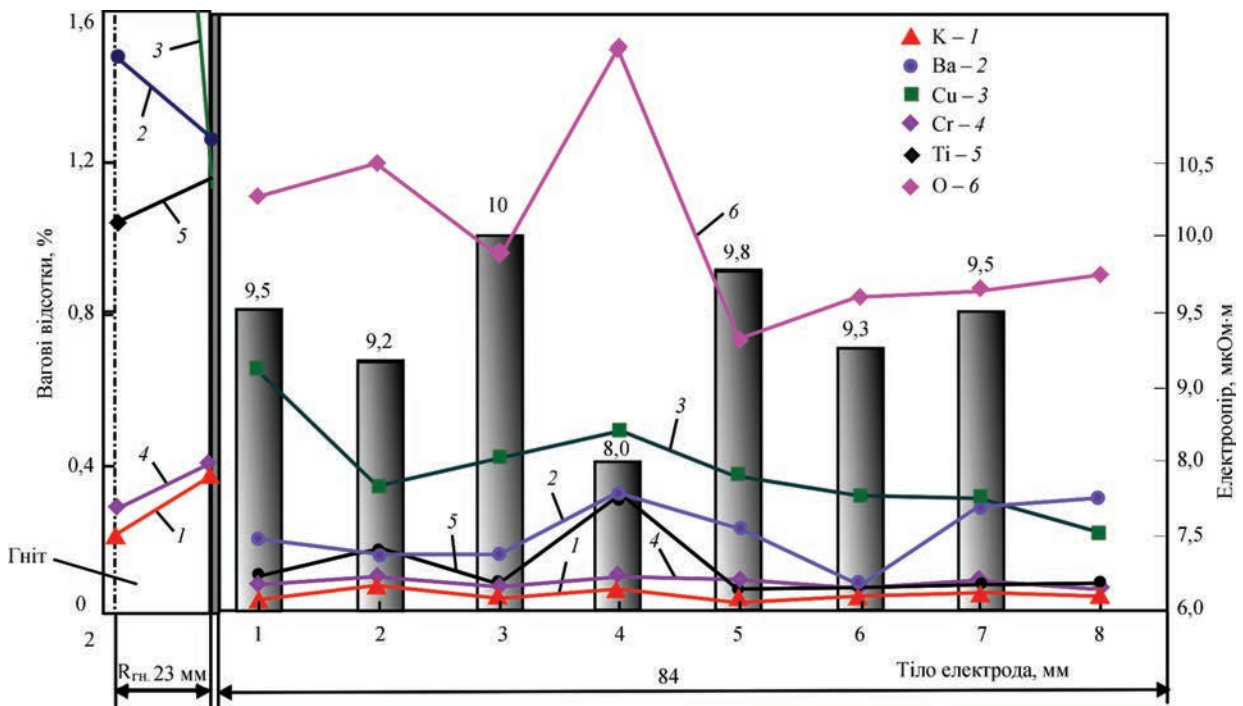


Рис. 3. Хімічний склад і ПЕО гнотових зразків, відібраних від недогарка електрода з вихідним діаметром 350 мм

ровідників, знижуючи питомий електроопір всього тіла електрода. Важливо зазначити, що навіть після значної витримки ($1,2 \cdot 10^5$ год) склад компонентів в гноті залишився більш високим, ніж у тілі електрода. Іншими словами, впродовж всієї плавки гніт є донором своїх компонентів К, Ва, Сг, Ті для тіла електрода. З тієї ж причини електропровідність гноту вище, ніж тіла електрода.

Про значне зниження ПЕО тіла електрода свідчить також і зовнішній вигляд гнотового електрода, що працює на печі (рис. 5). З рис. 5 видно, що нижня частина електрода на висоті порядку

600 мм від торця має циліндричну форму, а не конічну, характерну для монолітного електрода.

Отже, компоненти гноту внаслідок дифузії забезпечують істотне зниження ПЕО електрода. Крім того, процеси дифузії не припиняються протягом усього часу роботи електрода на печі. До складу гноту можна ввести й інші (крім зазначених у статті) компоненти, що мають практичне значення. Це може бути циркон ($2SiO_2, ZrO_2$), CaO та ін., що утворюють у тілі електрода термічно міцні карбіди Ca, Si, Zr, Hf.

Як зазначалося в роботі [4] зниження витрат графітованих гнотових електродів марки ЕГ при виплавці конструкційних сталей в 50-тонній ДСП складало близько 16 %. При утилізації відходів швидкорізальних та нержавіючих сталей на 6-тонній ДСП з електродами ЕГ цей показник становив, у середньому, 18 %. В першу чергу, зниження витрати гнотових електродів можна пояснити, як зазначалось

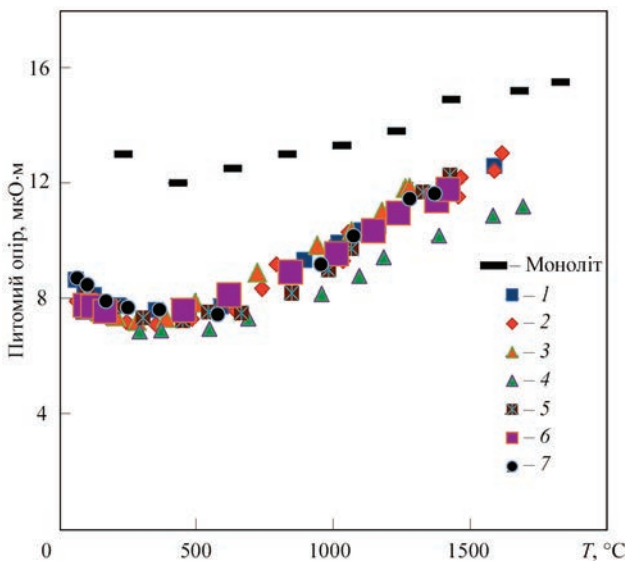


Рис. 4. Температурна залежність ПЕО зразків гнотового (після дифузії) і монолітного електродів



Рис. 5. Загальний вигляд нижньої частини гнотового електрода з вихідним діаметром 350 мм

вище, зниженням бічного окиснення електродів за рахунок безперервних (дифузійних) процесів поліпшення властивості тіла електрода та гноту.

Висновки

1. Велике значення у формуванні властивостей графітованого гнотового електрода і власне самого гноту, а також параметрів дуги мають процеси дифузії в системі гніт–електрод.

2. Проведено дослідження процесів дифузії і їх впливу на питомий електричний опір (ПЕО) тіла графітованого гнотового електрода марки ЕГ з вихідним діаметром 350 мм, який пройшов повний цикл нагріву на печі ДСП ПС-12 з наступним охолодженням до температури навколишнього середовища і витримкою $1,2 \cdot 10^5$ год. Встановлено, що в системі гніт–електрод має місце активна дифузія всіх основних компонентів гноту (К, Ва, Сu, Сr, Тi, O_2) в тіло електрода; компоненти гноту розподілені досить рівномірно по всьому перерізу електрода; в системі гніт–електрод не відбувається повної дифузії компонентів, мабуть цьому перешкоджає границя розділу між гнотом і тілом електрода; питомий електричний опір зразків дуже чутливий до хімічного складу зразка. При цьому, чим більше у зразку міді, барію, титану і інших компонентів гноту, тим менший його ПЕО і навпаки.

3. В результаті активної дифузії компонентів гноту в системі гніт–електрод ПЕО тіла гнотового електрода на 35...40 % нижче ПЕО тіла монолітного електрода.

Список літератури/References

1. 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>
2. 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 Elektrometalurhiya*, **1**, 48–53 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2021.01.06>
3. 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>
4. Bogachenko, O.G., Mishchenko, D.D., Goncharov, I.O. et al. (2024) Composite (cored) graphitized electrodes for industrial DC and AC steel-melting furnaces. *Suchasna Elektrometalurhiya*, **2**, 35–45 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2024.02.06>
5. Vodennikov, S.A. (2009) *Scientific-technological fundamentals of formation of composite coatings from ion melts for predictable provision of functional properties of porous materials*: Syn. of Thesis for Dr. of Techn. Sci. Degree. Zaporizhzhia, ZhNTU [in Ukrainian].
6. Grudnitskiy, O.M., Iskhakov, R.A.-R., Korobov, V.K. (2011) Ways of reduction of specific consumption of graphitized electrodes in electric arc furnaces. *Litio i Metallurgiya*, **1**, 100–101 [in Russian].
7. Makhnenko, O.V., Kostenevich, O.S., Saprykina, G.Yu. et al. (2024) Mathematical modeling of the processes of component diffusion in a wick-graphite electrode system in industrial DC arc steel melting furnace of DSP PS-12 type. *Suchasna Elektrometalurhiya*, **4**, 24–28 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2024.04.04>
8. Fialkov, A.S. (1997) *Carbon. Interlayer compounds and composites on its base*. Moscow, Aspekt Press [in Russian].

INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF DIFFUSION AND THEIR INFLUENCE ON ELECTRICAL RESISTIVITY OF GRAPHITIZED WICK ELECTRODES APPLIED IN INDUSTRIAL STEELMAKING ARC FURNACES

O.G. Bogachenko¹, D.D. Mishchenko¹, I.O. Goncharov¹, I.O. Neilo¹,

S.G. Kiiko², I.M. Logozinskiy², K.M. Gorban², A.G. Fedkov²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

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

²PJSC «Electrometallurgical Plant «Dniprospeystal».

81 Pivdenne Highway, 69008, Zaporizhzhya, Ukraine. E-mail: info@dss.com.ua

It is noted that during application of composite (wick) electrodes in industrial steelmaking arc furnaces, diffusion processes run in the wick-electrode system, which determine the properties of the graphitized wick electrode and of the wick proper, as well as the electric arc parameters. An investigation was performed of the diffusion processes and their influence on the electrical resistivity of the body of graphitized wick electrode of EG grade with the initial diameter of 350 mm, which has passed the full cycle of heating in DSP PS-12 furnace with subsequent cooling to ambient temperature and holding for $1.2 \cdot 10^5$ h. It was found that active diffusion of all the main components of the wick (K, Ba, Cu, Cr, Ti) into the electrode body occurs in the wick-electrode system. The higher the content of copper, barium, titanium and other wick components in the specimen, the lower is its electrical resistivity, and vice versa. Diffusion of the wick components in the wick-electrode system results in 35...40 % lower electrical resistivity of the wick electrode than that of the initial monolithic electrode. 8 Ref., 3 Tabl., 5 Fig.

Keywords: steelmaking arc furnaces, graphitized wick electrode, diffusion, electrical resistivity

Отримано 30.07.2025

Отримано у переглянутому вигляді 25.09.2025

Прийнято 12.11.2025