

КОМПОЗИТНІ (ГНОТОВІ) ГРАФІТОВАНІ ЕЛЕКТРОДИ ДЛЯ ПРОМИСЛОВИХ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ ПОСТІЙНОГО ТА ЗМІННОГО СТРУМУ

О.Г. Богаченко¹, Д.Д. Міщенко¹, І.О. Гончаров¹, І.О. Нейло¹,
М.М. Гасик², С.Г. Кійко³, І.М. Логозинський³, К.М. Горбань³

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

²Аалто Університет. 00076, м. Аалто, Еспоо, Фінляндія. E-mail: michael.gasik@aalto.fi

³ПрАТ «Дніпрспецсталь». 69000, м. Запоріжжя, вул. Південне Шоце, 81. E-mail: info@dss.com.ua

Представлені зведені дані за результатами лабораторних досліджень та всебічних промислових випробувань принципово нового виду продукції в електрометалургії — гнотів графітованих електродів, розроблених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, для дугових сталеплавильних печей постійного та змінного струму ємністю до 50 т. Показано, що останні десятиліття світове виробництво сталі безперервно збільшується, впритул наблизившись до позначки 2 млрд т на рік. Близько 30 % цього обсягу виробляється в дугових печах і до кінця цього десятиліття досягне 40 %. Показано, що дуга гнотового електрода має значно нижчі питомі показники струму і потужності на всіх ділянках (катод, стовп, анод), ніж дуга монолітного електрода. Встановлено, що падіння напруги на катодній плямі гнота в 2,3...3,3 рази менше, ніж у монолітного електрода. Гнотові електроди покращують всі техніко-економічні показники роботи дугових сталеплавильних печей постійного та змінного струму. Бібліогр. 13, табл. 4, рис. 9.

Ключові слова: дугові печі, графітовані гнотові електроди, геометричні і енергетичні параметри дуги, робота вихода електродів, питома потужність, питомий електричний опір

Вступ. Академік Б.Є. Патон у своїй програмній статті «Дума про метал» дав чіткий прогноз про те, що металеві матеріали в цілому і, насамперед, матеріали на основі заліза (сталі, сплави, чавуни) були є і будуть у найближчому майбутньому для нашої цивілізації основними конструкційними матеріалами для різноманітних потреб сучасної техніки.

Цей прогноз однозначно підтверджується бурхливим розвитком виробництва та споживанням сталі в останні десятиліття. Досить зазначити, що виробництво сталі збільшилося з 700 млн т у 1974 р. до 1,950 млрд т у 2021 р., тобто в 2,8 рази, незважаючи на безперервно зростаючі вимоги щодо охорони навколишнього середовища та жорстоку конкуренцію на ринку виробництва та споживання металевих матеріалів [1–4].

Сучасна металургія активно розвивається й у якісному напрямі. Багато уваги приділяється за-раз переходу на «зелену» металургію, розвитку виробництва металізованої сировини та ін. Повсюдно з'являються нові процеси, що поєднують виплавку сталі та її розлив, прокатку і термічну обробку сталевих напівфабрикатів та ін.

Більше третини у світовому виробництві сталі займає виплавка у дугових печах змінного (ДСП) та постійного (ДСП ПТ) струму. Це насамперед леговані сталі та сплави з високими стандартними та спеціальними властивостями для виробів

відповідального призначення. Передбачається, що світова частка електросталі у світі зросте до 40 % в наступне десятиліття. Очікується, що виробництво електросталі в Китаї зросте до 25 % порівняно з 10 % у 2020 р. Природно, збільшиться виробництво електродів. При цьому основна увага приділятиметься виробництву високоякісних електродів марки ЕГСП (УНР) діаметром 700 мм і більше [5]. Україна — відома у світі металургійна держава і до війни 2022 р. твердо займала місце у першій десятці світових виробників сталі. Великий внесок у теорію та розвиток електросталеплавильного виробництва зробили українські вчені та виробники — Б.Є. Патон, Б.І. Медовар, М.М. Доброхотов, В.А. Єфімов, В.І. Лакомський, А.Ф. Трегубенко, В.В. Лепорський та багато інших.

Масштабні роботи з удосконалення технології і обладнання для виплавки та переділу сталі ведуться в умовах жорсткої конкуренції на ринку металопродукції. Ці роботи мають на меті покращити такі найважливіші техніко-економічні показники як витрата електроенергії та графітованих електродів, легуючих та феросплавів, продуктивність печей та ін. за умов забезпечення високої якості металу, у задоволенні жорстких вимог до охорони навколишнього середовища та покращення умов роботи обслуговуючого персоналу.

О.Г. Богаченко — <http://orcid.org/0000-0002-3306-6626>, Д.Д. Міщенко — <http://orcid.org/0000-0003-3612-1819>,

І.О. Гончаров — <http://orcid.org/0000-0003-2915-0435>, І.О. Нейло — <http://orcid.org/0009-0003-4771-3630>,

М.М. Гасик — <https://orcid.org/0000-0002-5782-7987>, С.Г. Кійко — <http://orcid.org/0000-0002-1161-5866>

© О.Г. Богаченко, Д.Д. Міщенко, І.О. Гончаров, І.О. Нейло, М.М. Гасик, С.Г. Кійко, І.М. Логозинський, К.М. Горбань, 2024

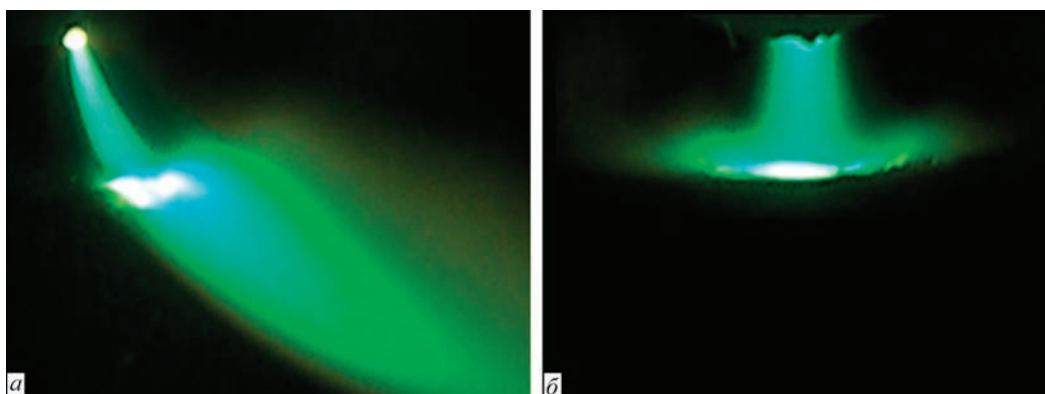


Рис. 1. Загальний вигляд дуги графітованого монолітного (а — $U_d = 62$ В; $I_d = 720$ А; $d_k = 2,5$; $d_A = 9,5$ мм) і гнотового (б — $U_d = 32$ В; $I_d = 720$ А; $d_k = 9,5$ мм; $d_A = 17$ мм) електродів при рівних довжинах дуг ($L_d = 15$ мм)

Дослідження та обговорення результатів.

Відомо, що техніко-економічні показники роботи дугових печей багато в чому визначаються експлуатаційною надійністю графітованих електродів. У собівартості електросталі електроди займають значну частку — до 8...15, іноді до 30 %. Тому важко переоцінити значущість робіт, які ведуть виробники електродів щодо забезпечення необхідного питомого електричного опору (ПЕО), збільшення густини електричного струму, забезпечення високих механічних характеристик електродів тощо. Одна із сучасних світових тенденцій у вдосконаленні роботи дугових печей полягає у збільшенні електричного струму до 80...100 кА. Це потребує зниження ПЕО до 4...5 мкОм·м та збільшення діаметра і довжини графітованих електродів. Такі відомі компанії як «SGL», «Grafftech», «Укрграфіт» та ін. вже освоїли виробництво електродів діаметром 700, 750 та 800 мм. Довжина електродів досягла 3500 мм [5, 6]. Техніко-економічна оцінка показує, що зменшення ПЕО на 0,2 мкОм·м дає зниження енерговитрат на 6...8 % на тонну металу.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України розроблено і спільно з науковими центрами та промисловими підприємствами досліджується та випробовується принципово новий вид продукції для електрометалургії — графітовані композитні (гнотові) електроди для дугових сталеплавильних печей постійного та змінного струму.

Методика досліджень. На початковому етапі робіт основні фізичні, хімічні та енергетичні властивості гнота і гнотових електродів (вольт-амперна характеристика (ВАХ), струм в системі катод-анод, емісійні властивості, розподіл потужності по ділянках дуги тощо) досліджували в умовах ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Для цього було створено спеціалізоване лабораторне обладнання, на якому застосовували графітовані електроди діаметром 50 мм. Промислові випробування гнотових елек-

тродів проводили на 12-тонних печах постійного струму типу ДСП ПС-12 і трифазних печах змінного струму типу ДС-6Н1 і ДСВ-50.

Гнотові електроди отримують шляхом свердління в серійному монолітному електроді одного або кількох повздовжніх отворів, в які набивається суміш, що містить матеріали (компоненти) для забезпечення термічної стійкості гнота, регулювання його електропровідності та компоненти з елементами I та II груп таблиці Менделєєва з низькою роботою виходу електронів*. Завдяки цим компонентам із мінімальними витратами енергії забезпечуються сприятливі термодинамічні умови для іонізації газів у стовпі сильноточної електричної дуги в ДСП та ДСП ПС. Перші ж порівняльні випробування гнотових і монолітних електродів на лабораторному обладнанні та на промислових печах показали, що дуга гнотового електрода в порівнянні з дугою монолітного принципово відрізняється геометричними і енергетичними параметрами та дуже високою стабільністю (рис. 1).

Встановлено, що діаметр катодної плями на гнотовому електроді орієнтовно в 4 рази перевищує аналог на монолітному. У 2...3 рази розрізняються діаметри анодів на гнотовому та монолітному електродах. Дуга гнотового електрода завжди тримається на гноті і займає практично всю площу перерізу електрода як результат взаємної дифузії компонентів в системі гніт-електрод. Вона не мігрує по торцю електрода і не виходить на його бокову поверхню, забезпечуючи стабільне, м'яке нагрівання розплаву та вертикальне положення [7, 8]. При цьому, в результаті міграції дуги монолітного електрода шлейф її плазми може становити 7...8 довжин дуги і досягати футерування печі, обумовлюючи перегрів і руйнування футерування. Ці та інші особливості дуги гнотового електрода реалізуються в покращенні практично всіх техніко-економічних показників роботи дугових печей.

*У статті не наводяться склади гнотів. Гноти позначені літерою Г з індексами 1, 2, 3 і т.д.

Таблиця 1. Показники дуг на ділянках монолітного та гнотового електродів при рівних напругах дуг

Параметри дуги	Електрод		Співвідношення показників
	Монолітний	Гнотовий	
$U_d, \text{В}$	50,0	50,0	—
$U_k, \text{В}$	22,5	9,7	$\frac{U_{\text{кгн.}}}{U_{\text{кмон.}}} = \frac{22,5}{9,7} = 2,32$
$U_a, \text{В}$	13,0	15,0	—
$U_c, \text{В}$	$50 - (22,5 + 13) = 14,5$	$50 - (9,7 + 15) = 25,3$	$\frac{U_{\text{сгн.}}}{U_{\text{смон.}}} = \frac{25,3}{14,5} = 1,74$
$I, \text{А}$	350	450	—
$L_d, \text{мм}$	15	23	$\frac{U_{\text{дгн.}}}{U_{\text{дмон.}}} = \frac{23}{15} = 1,53$
$b, \text{В/мм}$	$\frac{14,5 \text{ В}}{15 \text{ мм}} \approx 1 \text{ В/мм}$	$\frac{25,3 \text{ В}}{23 \text{ мм}} \approx 1,1$	—

Зазначені відмінності в геометричних і електричних показниках зумовлюють те, що всі ділянки дуги гнотового електрода мають суттєво менші питомі показники густини струму та потужності, ніж відповідні ділянки дуги монолітного електрода. Розрахунки виконували за даними плавов на 12-тонній печі постійного струму при рівних напругах дуг (220 В) та рівних струмах (11000 А) для монолітного та гнотового електродів. Порівнювали п'ятнадцять показників. Досить відзначити, що питомий струм, віднесений до одиниці поверхні або об'єму дуги і питома потужність на катоді гнотового електрода в 16,0 і 37,5 разів відповідно менше, ніж на катоді монолітного електрода [9].

Результати досліджень. Деякі властивості і особливості дуги гнотового електрода. Порівняльні дослідження розподілу напруги по ділянках дуг проводили на лабораторному обладнанні із застосуванням лабораторних монолітних і гно-

тових електродів діаметром 50 мм та гнотом складу Γ_4 . Падіння напруги на ділянках дуги та струм, за умови однакової напруги на дугах (50 В), наведені у табл. 1, з даних якої слідує: довжина дуги L_d гнотового електрода склала 23 мм, L_d монолітного — 15 мм, тобто більше в 1,53 рази; напруги на анодних плямах дуги U_a для цих електродів близькі за значеннями і рівні 15 і 13 В відповідно (середні дані за трьома вимірами); струм емітерів $I_{\text{ем}}$ склав 100 А, тобто загальний струм збільшився з 350 до 450 А, що склало 28,5 %; падіння напруги на стовпі дуги U_c гнота в 1,74 рази вище, ніж на стовпі дуги монолітного електрода; градієнти напруги в дузі гнотового і монолітного електродів близькі (1,0 і 1,1 В/мм); особливий інтерес становить те, що катодна напруга U_k монолітного електрода (22,5 В) у 2,32 рази перевищує U_k гнотового електрода (9,7 В).

Таблиця 2. Показники падіння напруги на ділянках дуг при рівних довжинах дуг і складах гнотів $\Gamma_1 \dots \Gamma_5$

Параметри дуги	Монолітний електрод	Γ_1	Γ_2	Γ_3	Γ_4	Γ_5
$U_d, \text{В}$	<u>52...55</u> 54,0	<u>35...48</u> 39,0	<u>36...53</u> 42,0	<u>36...39</u> 37,5	<u>38...47</u> 41,0	<u>38...39</u> 39,5
$U_k, \text{В}$	<u>18...18</u> 18,0	<u>5...6</u> 5,5	<u>5...8</u> 7,0	<u>5...7</u> 6,0	<u>6...9</u> 7,5	<u>5...9</u> 7,0
$U_c, \text{В}$	<u>20...25,5</u> 23,0	<u>17...27</u> 20,0	<u>21...30</u> 22,0	<u>20...23</u> 21,0	<u>20...24</u> 21,0	<u>19...23</u> 20,5
$U_a, \text{В}$	<u>11,5...14</u> 13,0	<u>13...15</u> 13,5	<u>10...15</u> 13,0	<u>10...11</u> 10,5	<u>12...14</u> 13,0	<u>10...12</u> 11,0
Струм, А	<u>300...307</u> 304	<u>300...360</u> 354	<u>300...350</u> 350	<u>313,5...420</u> 367	<u>320...387</u> 350	<u>310...320</u> 313
$b, \text{В/мм}$	1,53	1,33	1,46	1,4	1,37	1,37

Таблиця 3. Характеристики монолітного та гнотового електродів

Номер з/п	Параметри режиму	Електрод		Примітка
		монолітний	гнотовий	
1	U_d , В	64	64	—
2	I_d , А	400	500	$I_{cm} = 500 - 400 = 100$ А; $\Delta = 25$ %
3	P_d , Вт	25600	32000	$32000:25600 = 1,25$ за рахунок I_{cm}
4	$L_{d\text{вихідна}}$, мм	10	10	—
5	$L_{d\text{розриву}}$, мм	21	32	$\frac{33}{21} = 1,52$
6	Діаметр катода, мм	~5	~16	—
7	Діаметр стовпа дуги, мм	~8	~20	—
8	Діаметр анода, мм	~15	~35	—

Падіння напруги на ділянках дуг при їх рівних довжинах (15 мм) для складів гнотів $F_1...F_5$ представлені в табл. 2, з якої випливає: напруги U_a гнотового і монолітного електродів практично рівні (10...13 В); напруги на дугах U_d монолітного і гнотового електродів склали 55 і 37,2 В (середні значення по 5 дослідям), тобто співвідношення дорівнює 1,48 рази. Цей показник близький до різниці довжин дуг в разі рівних напруг (1,53) (табл. 1).

Підтверджується те, що рівні струми можна забезпечити при напругах менших орієнтовно в 1,5 рази у разі гнотового електрода в порівнянні з монолітним; падіння напруги на стовпі дуги U_c монолітного і гнотового електродів мають близькі значення — 25,5 і 20,8 В (середні значення по 5 дослідям); як і в разі дослідів з рівними напругами (табл. 2) принципово відрізняється падіння напруг на катодній плямі монолітного і гнотового електродів: 18,0 і 5,5 В (середнє по 5 складам), $18,0:5,5 = 3,3$ рази.

Важливо і те, що відмічені параметри мають досить чітку стабільність при дуже великих відмінностях в складах гнотів.

Проведено також експерименти з визначення: критичної довжини дуги, при якій відбувається її розрив ($L_{розр.}$); величини струмів емітерів (I_{cm}); геометричних параметрів дуги.

Отримані дані характеристик монолітного і гнотового електродів наведені в табл. 3.

ВАХ досліджували на монолітному і гнотовому електродах п'яти складів гнотів ($G_1...G_5$). Результати представлені на рис. 2.

Як видно із рис. 2 струм порядку 400 А на гнотових електродах забезпечується при напрузі в 1,5...2,5 рази менше, ніж на монолітному електроді або при рівних напругах на дугах струм на гнотових електродах в 1,5...2,0 рази перевищує струм монолітного електрода.

Відомо, що однією з найважливіших характеристик графітованих електродів для дугових сталеплавильних печей є ПЕО. Цей показник має певне значення для кожної з чотирьох марок електродів (ЕГ, ЕГП, ЕГС, ЕГСП), що використовуються на всіх дугових печах. При цьому, чим вища якість електрода (від ЕГ до ЕГСП), тим нижче в них ПЕО і, як слідство, вище допустимі струмові навантаження. Наприклад, для електродів діаметром 508 мм марки ЕГ, що використовуються на 50-тонних печах, цей показник становить 15...18 А/см², а для марки ЕГСП — 22...28 А/см².

Гніт та електрод створюють єдину систему гніт-електрод і не ізольовані один від одного. Тому ПЕО гнотового електрода буде відрізнятися від ПЕО монолітного електрода-аналога.

Особливістю виробництва та експлуатації гнотових електродів є те, що після набивання в електрод гнотової маси він не піддається якій-небудь

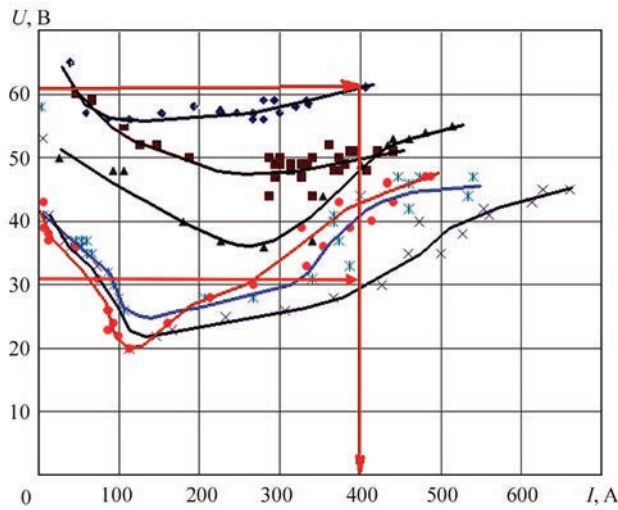


Рис. 2. ВАХ дуг монолітного і гнотового електродів: * — монолітний електрод; ◆ — G_1 ; ■ — G_2 ; △ — G_3 ; ● — G_4 ; ● — G_6

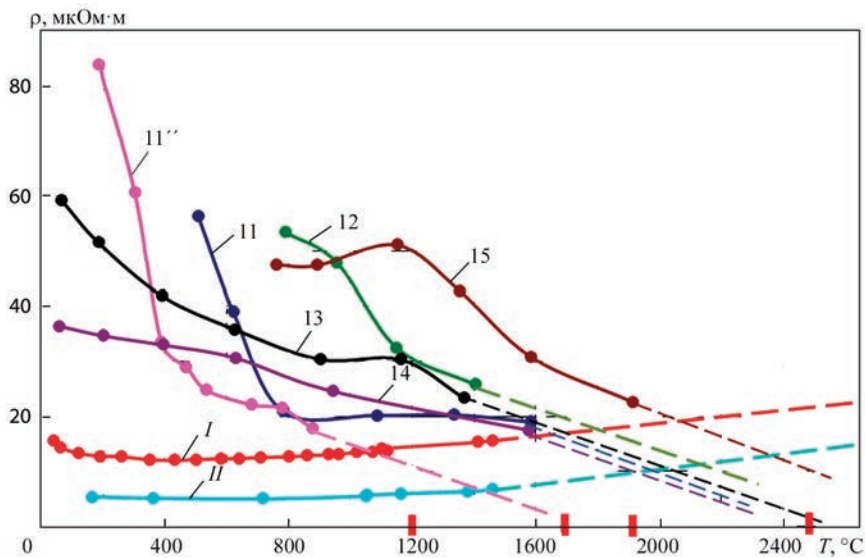


Рис. 3. Залежність питомого електричного опору гнотів від температури: 11...15 — склади гнотів, умовно; I і II — монолітні електроди

термообробці і встановлюється на піч у сирому вигляді. Отже всі процеси — видалення сполучних, фізико-хімічні процеси, формування структури та властивостей гнота і електрода — відбуваються при нагріванні електрода від температури 20...30 °С (встановлення у свічку) на печі до порядку 4000 °С на робочому торці електрода в придужовій частині. При цьому всі зазначені процеси мають місце у замкнутому просторі печі, в умовах дефіциту кисню та надлишку вуглецю.

У зазначених умовах не викликають сумніву два фактори: перший, в системі гніт-електрод мають місце активні процеси взаємної дифузії компонентів; другий, враховуючи постійно зростаючу температуру по довжині електрода, всі відзначені вище фізико-хімічні процеси в системі гніт-електрод знаходяться у квазістаціонарному стані. Тому будь-який

аналіз згаданих процесів доцільно проводити в певних температурних зонах по довжині електрода.

Проведені дослідження і експерименти свідчать про те, що ПЕО гнотового графітованого електрода (система гніт-електрод) залежить від багатьох технологічних та енергетичних факторів і процесів, які на працюючій печі знаходяться в квазістаціонарному стані. В такому ж стані знаходяться і ПЕО гнотового електрода, тобто змінюється у часі як за довжиною, так і за перерізом. В якості приклада на рис. 3 і 4 наведені результати досліджень температурної залежності ПЕО від складу гнотів. На рис. 3 приведені результати випробувань гнотів 5-ти складів ($\Gamma_{11} \dots \Gamma_{15}$). Як критерій оцінки кожного складу прийнята температура, при котрій криві ПЕО гнотів перетинаються із ПЕО двох вихідних монолітних електродів (криві I і II). Видно, що ПЕО гнота дорівнює ПЕО елек-

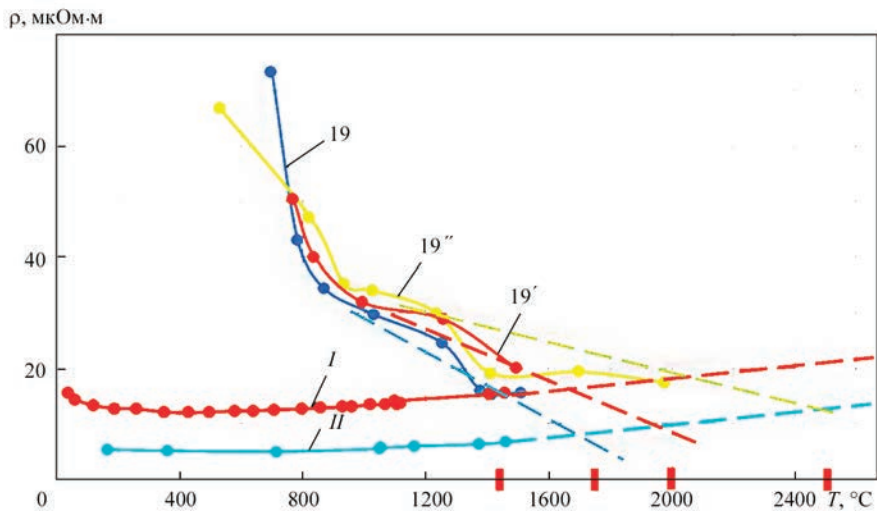


Рис. 4. Залежність питомого електричного опору від температури сирих гнотів на основі TiN (пояснення наведені в тексті і в табл. 2)

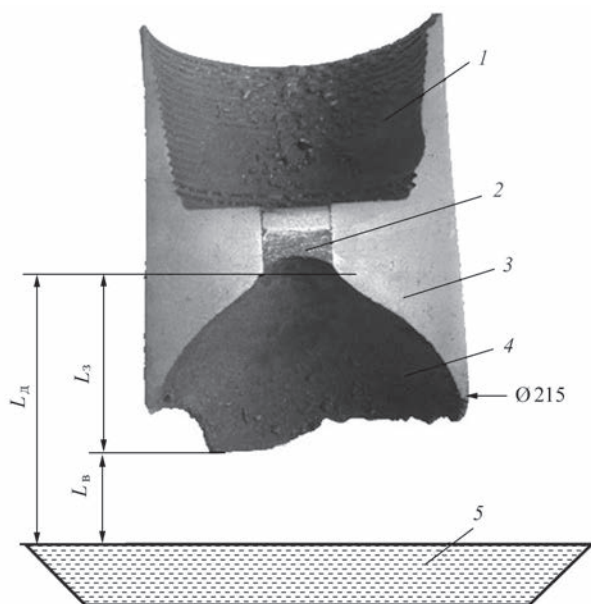


Рис. 5. Макроструктура робочого торця графітованого електрода з вихідним діаметром 350 мм (з печі ДСП ПС-12): 1 — ніпельне гніздо; 2 — гніт; 3 — електрод; 4 — півсфера; 5 — рідкий шлак

трода і далі може зменшуватися в діапазоні температур 1600...2500 °С в залежності від складу гнотів та ПЕО вихідних монолітних електродів. Ще більш наочно, температурна залежність ПЕО гнота виявилася при введенні до його складу нестехіометричного нітриду титану ($TiN_{0,8}$). У цьому випадку вирівнювання ПЕО гнотів і електродів носить явно виражений характер і відбувається у тому ж інтервалі температур (1400...2000 °С) відносно вихідного монолітного електрода (I). Відносно монолітного електрода з низьким ПЕО (II)

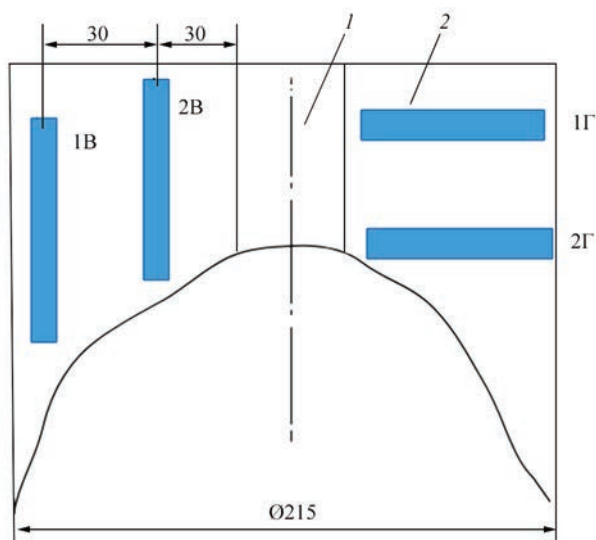


Рис. 6. Схема вирізання зразків: 1 — гніт; 2 — електрод

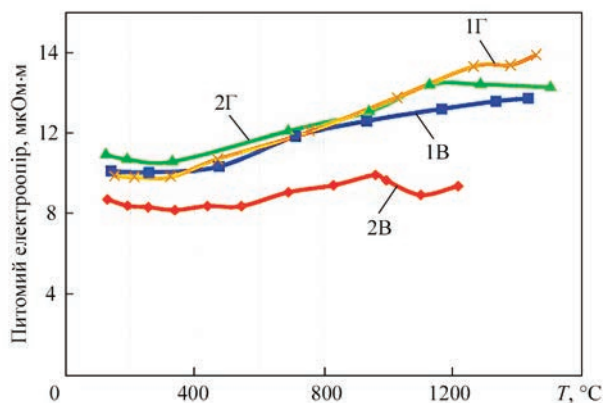


Рис. 7. Температурна залежність питомого електричного опору зразків електродного матеріалу

температурний інтервал перетину ліній ПЕО зрушується праворуч до орієнтовно 1800...2500 °С.

Таким чином, область рівності ПЕО гнотів і електродів знаходиться в температурному інтервалі 1200...2500 °С і визначається складом гнотів і ПЕО електрода. В свою чергу, ці показники визначаються ступенем завершеності процесів дифузії в системі гніт–електрод і фактичним станом створення (розкладанням) хімічних сполук з властивостями напівпровідників, що в підсумку знижують ПЕО системи гніт–електрод.

Перші дослідження дифузії і визначення ПЕО в системі гніт–електрод були проведені на натурних зразках від промислового електрода з вихідним діаметром 350 мм з печі ДСП ПС-12, що пройшов нагрів від температури 20...30 °С до порядку 3900...4000 °С (у придужовій частині) і витримку на протязі 95 тис. год.

На цих плавках використовували гноти складу Γ_0^* . Після 1,0...1,5 год від включення печі на торці електрода формувалася характерна для гнотового електрода увігнута півсфера, обумовлена наявністю гнота у центрі електрода. Форма півсфери визначається електричним режимом, електричним опором тіла електрода та гнота, складом металу і шлаку та іншими факторами. Загальний вигляд робочого торця електрода з гнотом, що пройшов нагрівання до 3900...4000 °С і природне охолодження до кімнатної температури, представлено на рис. 5. Від торця електрода з гнотом було відібрано чотири зразки за схемою, представленою на рис. 6. Температурна залежність ПЕО цих зразків була визначена на спеціалізованому устаткуванні. Результати випробувань представлені на рис. 7, з якого видно, що: ПЕО горизонтальних зразків (1Г і 2Г) і крайнього вертикального (1В) практично однакові, що свідчить про високий сту-

*Склад гнота та розподіл компонентів гнота в тілі електрода в статті не надається.

пінь ізотропності за цим показником у гнотовому графітованому електроді; вертикальний зразок 2В має питомий електричний опір суттєво менший (у середньому на 12 %) і практично незмінний, ніж решта. Це пояснюється тим, що елементи з низькою роботою виходу електронів, що перейшли в результаті дифузії з гнота в тіло електрода, збереглися в центральній зоні електрода у більшій кількості, ніж у крайньому зразку 1В. Збіднення зразка 1В зазначеними елементами відбулося також в результаті дифузії при охолодженні темплета до кімнатної температури.

Результати застосування гнотових електродів на промислових печах постійного струму. Наведені вище розрахункові, експериментальні і практичні дані переконливо свідчать про явні енергетичні та технологічні переваги гнотової дуги.

Перші промислові дослідження гнотових електродів були проведені на 12-тонній печі постійного струму типу ДСП ПС-12. В якості шихти використані відходи 70FeSiMn, тобто порівняно простої, однорідної шихти. До задач цих випробувань входили: визначення техніко-економічних показників на плавках із моноклітичними і гнотовими електродами на штатних режимах, на коротких та довгих дугах, на знижених і підвищених напругах дуг, визначення довжини дуг до розриву і т. ін. Як приклад, на рис. 8 показані узагальнені дані по питомій витраті активної електроенергії для моноклітичних (M_1 і M_2) електродів, ніпельів (Н), порожнього електрода (П), гнотових електродів (Γ_1 , Γ_2 і Γ_6) на серійних режимах.

Із рис. 8 слідує, що незалежно від складу гнотів (Γ_1 , Γ_2 і Γ_6) гнотві електроди забезпечують меншу витрату електроенергії, ніж моноклітичні, порожні та ніпель.

Підсумкові дані по використанню гнотових електродів в порівнянні з моноклітичними при переплаві та рафінуванні 70FeSiMn на 12-тонній ДСП ПС викладені у роботах [10, 11] і є такі: стабільна дуга у широкому діапазоні змін електричних режимів та довжини дуги; економія активної електроенергії до 10 %; зниження реактивної потужності до 23 %; збільшення продуктивності печі до 12 %.

Ці результати послужили переконливою підставою використовувати гнотві електроди для переплаву на печі ДСП ПС-12 складнішої, багато фракційної, важкої шихти. Такою шихтою був каталізатор — продукт очищення нафти. Основу його становить Al_2O_3 . У каталізаторі міститься також велика кількість нікелю, молібдену (по 10...12 % кожного елементу), ванадію. Особливістю є високий вміст сірки (до 4...6 %), та високий залишковий вміст нафтопродуктів. Основна мета

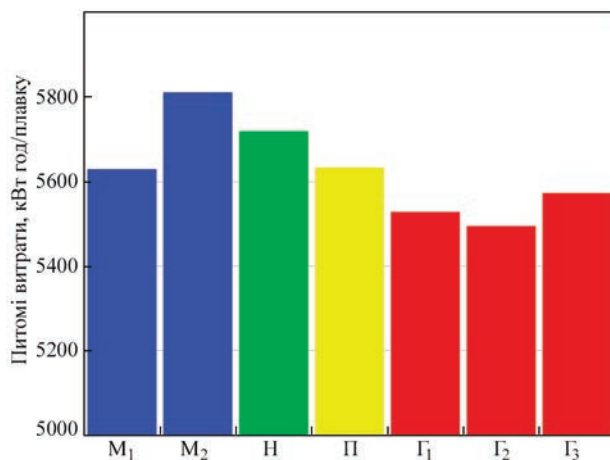


Рис. 8. Питомі витрати активної електроенергії на плавках по серійному режиму з використанням моноклітичних (М) електродів, полого (П), ніпельної частини (Н) та гнотових електродів (Γ_1 , Γ_2 , Γ_6)

переплаву цього матеріалу полягала в тому, щоб максимально отримати молібден і нікель (зливки), а також отримати шлак з високим вмістом V_2O_5 (більше ніж 12 %) для виробництва 50 % FeV. Попередня підготовка каталізатора перед плавкою не проводилася, що зумовлювало вкрай нестабільний електричний та технологічний режими і, як наслідок, техніко-економічні показники плавки. На цьому тлі перевірка ефективності роботи гнотових електродів представляла великий інтерес. Робота включала три етапи.

Етап 1. Переплав каталізатора з отриманням ванадієвмісного шлаку і металевої фази (зливків), що містить Ni і Mo.

Етап 2. Рафінування зливків і отримання продукту з максимально високим вмістом Ni та Mo.

Етап 3. Отримання ферованадію.

В якості приклада на рис. 9 показані порівняльні результати переплаву каталізатора на моноклітичних і гнотових електродах складів Γ_2 і Γ_{11} .

З рис. 9 випливає, що продуктивність печі при використанні гнотових електродів зростає на 25,6 %, зниження угару Ni, Mo, Fe складає до 9 %, економія електроенергії до 30 % в залежності від складу гнотів.

Етап 2. При переплаві металевої фази застосування гнотових електродів забезпечило збільшення продуктивності печі на 9,6 %, зниження угару нікелю і молібдену на 10,3 % та економію електроенергії на 2,8 %.

Аналогічні результати були отримані при виплавці 50 % FeV: зріст продуктивності на 4,2 %, вилучення ванадію з шлаку збільшилося на 17,4 % і економія електроенергії склала 7,1 %.

Насамперед ці дані свідчать про те, що електрод з гнотом на всіх стадіях переплаву каталі-

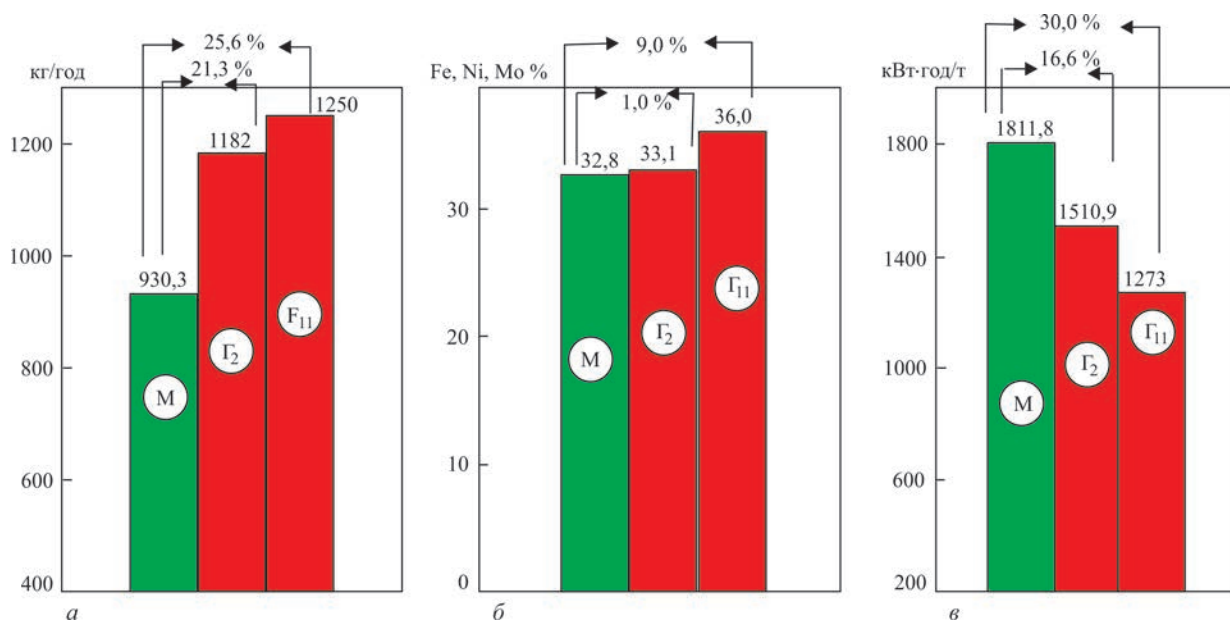


Рис. 9. Продуктивність печі (а), вихід металевої фази (зниження угару Fe, Ni, Mo), % (б) і витрата електроенергії (в) при переплаві каталізатора із застосуванням монолітних (М) та гнотових (Г₂ і Г₁₁) електродів

затора та його продуктів мають суттєві переваги порівняно з монолітними електродами.

Істотною перевагою гнотових електродів є також те, що під час їх використання розбіг часу плавлення зменшується в 2,0...2,5 рази, тобто забезпечується висока стабільність електричних режимів і теплових умов та ККД печі.

Як зазначалося, важливою відмінністю гнотових електродів є те, що під час плавлення робочий кінець такого електрода завжди має форму увігнутої півсфери, незалежно від складу гнота та електричних режимів. Ця півсфера обумовлює наявність закритої і відкритої частин дуги, довжину яких можна регулювати. Це зумовлює два основних технологічні чинники. По-перше, вона може сконцентрувати до 50 % потужності дуги. Це в поєднанні з високою стабільністю довгих дуг на гнотових електродах забезпечує ефективне розплавлення великогабаритної шихти, менше число обривів дуг при проплавленні колодязів та ін. По-друге, припускаємо, що має знизитися на 20...30 % витрата вогнетривів, зменшитися кількості ремонтів печі і зрости її загальна продуктивність.

Підтверджено також, що гнотова дуга обумовлює зниження рівня шуму при роботі ДСП ПС-12 на 10...12 %. Більш детально результати використання гнотів на печах постійного струму викладені в роботах [7, 8, 10, 11] і у зведених табл. 4.

Результати застосування гнотових електродів на промислових печах змінного струму. На даний час у світі експлуатуються близько 1200 електро-дугових сталеплавильних печей, у т.ч. 200 печей постійного і 1000 печей змінного струму. В тому числі найбільш розповсюджені промислові печі

ємністю від 6 до 50 т (старі печі) і 100...180-тонні печі надвисокої потужності, які встановлені в останній час у різних країнах Європи, Азії, Америки. Тому великий інтерес представляє можливість застосування гнотових електродів на печах змінного струму. Перші такі плавки були проведені на промисловій трифазній 6-тонній печі типу ДС-6Н1.

Переплаву піддавали відходи абразивної зачистки швидкорізальних сталей і жароміцних сплавів з великим обрізом вуглецевих сталей та шарикопідшипникових ШХ15. В процесі робіт були випробувані електроди з гнотами п'яти складів (Г₁₆, Г₁₈, Г₁₉, Г₂₀, Г₂₁). Плавки проводили з різними поєднаннями гнотових і монолітних електродів, що одночасно працюють в печі: три гнотових; два гнотових і один монолітний; один гнотовий і два монолітних.

Для адекватного порівняння результатів плавки проводили на штатних електричних режимах з фіксацією показників струму, напруги дуги та інших параметрів.

Як і в разі печей постійного струму відразу була відзначена висока стабільність всіх показників електричного режиму на печі ДС-6Н1. Було встановлено, що: час стабілізації дуги від першого міжфазного замикання до безперервного горіння у гнотових електродах в 1,75...5,40 рази менше, ніж у монолітних; час частих розривів дуги у гнотових електродах в 3...10 разів менше, ніж у монолітних.

Ці фактори обумовлюють швидку стабілізацію електричного режиму плавки, швидке формування колодязів і ефективне плавлення шихти. Наслідком цього є також зниження частоти і сили кидків струму в первинну мережу, що покращує якість електроенергії, забезпечуючи більш стійку

Таблиця 4. Основні техніко-економічні показники роботи промислових дугових печей постійного і змінного струму з гнотовими електродами*

	Показники плавки	12-тонна ДСП ПС, електрод діаметром 350 мм	6-тонна ДСП, електрод діаметром 3×300 мм	50-тонна ДСП, електрод діаметром 3×508 мм
ЕНЕРГЕТИКА	Стабільність дуги	Висока	Висока	Висока
	Реактивна потужність	До 23 %	—	—
	Збільшення cosφ	3 0,88 до 0,94	3 0,81...0,86 до 0,91...0,94	—
	Зниження часу від першого короткого замикання до стійкого горіння дуги	В 2,4...4,8 рази	В 2,75...5,4 рази	—
	Зниження часу стабілізації дуги на колодязях і при розплавленні шихти	В 1,8...2,6 рази	В 2,3...3,8 рази	В 2,0...2,5 рази
	Зменшення частоти та сили кидків у первинну мережу	Значно	Значно	Значно
	Зменшення коефіцієнтів гармонік струму при проплавленні колодязів і на рідкому металі	—	3 0,65...0,59 до 0,28...0,09	3 0,9; 3,4; 1,1 до 0,3; 0,2; 0,3 відповідно
	Зменшення діапазону розкиду струмів по фазах у період проплавлення колодязів і розплавлення шихти	—	На 25...40 %	На 30...50 %
	Спотворення синусоїдальних кривих струму і напруги в основні періоди плавки	—	Значно менше	Значно менше
	Зменшення діапазону коливань напруги і струму	Напруги на 15 %, струму на 31 %	—	—
ТЕХНОЛОГІЯ	Зниження питомої витрати активної електроенергії (в середньому), кВт·год/т (%)	16,6...30,0 %	В середньому на 10 %	7...14 %
	Скорочення часу розкиду плавок (підвищення стабільності)	2,0...2,5	1,5...2,0	2,0...2,5
	Підвищення продуктивності печі, кг/год	До 25 %	На 23 %	На 18...22 %
	Зниження угару легуючих елементів (Mo, Ni та ін.)	До 10,3 %	—	—
	Зниження загального угару шихти	До 3 %	До 2...3 %	До 3,5 %
	Зниження питомої витрати гнотових електродів марки ЕГ (в середньому), кг/т	—	На 18 %	На 16 %
МЕТАЛУРГІЯ	Зниження вмісту азоту в сталі (в середньому)	—	На 15 %	На 19 %
ЕКОЛОГІЯ	Зниження рівня шуму печі	На 7...10 %	На 8...10 %	На 7...10 %
	Зниження кількості викидів пилу та газів	На 8...12 %	На 7...12 %	На 10...15 %

*Порівняння ведеться з монолітними електродами.

роботу таких потужних споживачів електроенергії, як сусідні печі, агрегати для позапічної обробки, прокатні стани та ін.

Більш детально результати експериментальних плавок на печі ДС-6Н1 викладені в роботах [12, 13] та зведений табл. 4.

Далі експериментальні роботи проводили на 50-тонній печі трифазного змінного струму типу ДСВ-50, на якій застосовуються графітовані електроди діаметром 508 мм.

Програма робіт включала оцінку впливу масштабного фактора на техніко-економічні показники 6- та 50-тонної ДСП, роботу печі у безперервному режимі (плавка на плавку) протягом 8 діб, особливості робіт печі на довгих дугах, контроль параметрів електричних і техноло-

гічних режимів плавки і т. ін. Для цього були виготовлені 24 електроди діаметром 508 мм з гнотовими вставками чотирьох складів (Γ_{18} , Γ_{22} , Γ_{23} , Γ_{27}). Для коректного порівняння результатів плавки проводили на штатних електричних режимах. Проводилися також записи осцилограм струму і напруги, частина яких виконана на довгих дугах та знижених струмах. Всього із застосуванням гнотових електродів було виплавлено 1968 т вуглецевих, низьколегованих високоміцних конструкційних та легованих інструментальних сталей.

Отримані результати переконливо свідчать про високу ефективність застосування гнотових електродів при виплавці всього асортименту конструкційних і інструментальних сталей як на штатних,

так і дослідних режимах. Ці результати викладені у роботі [9] та зведеній табл. 4.

Висновки

1. Зазначено, що в останні десятиліття світове виробництво сталі безперервно зростало і впритул наблизилося до позначки 2 млрд т у 2021 р. Це у 2,86 рази більше, ніж у 1970 р. (0,7 млрд т). Близько 30 % сталі виробляється в дугових печах змінного та постійного струму. До кінця десятиліття цей показник зросте до 40 %. При цьому велика увага приділяється зеленим технологіям та застосуванню водню замість вуглецю.

2. Встановлено, що рівні довжини дуг гнотового і монолітного електродів забезпечуються при напрузі на дузі гнотових електродів орієнтовно в два рази меншій, ніж на дузі монолітних електродів при рівних струмах.

3. Дуга гнотового електрода завжди стабільна, розосереджена, не мігрує по торцю електрода і має значно більші розміри, ніж дуга монолітного електрода. Тому всі питомі показники (густина електричного струму, потужність) дуги гнотового електрода значно нижчі, ніж у дуги монолітного.

4. Вперше показано, що падіння напруги на катодній плямі дуги гнотового електрода в 2...3 рази менше, ніж на катодній плямі дуги монолітного.

5. Встановлено, що при рівних напругах на дугах (гнотового та монолітного електродів) довжина дуги гнотового електрода в середньому у 1,5 рази більша, ніж монолітного.

6. Встановлено, що падіння напруги на анодних плямах гнотового і монолітного електродів приблизно однакові.

7. Струм емітерів, що містяться у гноті, може становити 25...43 % робочого струму плавки.

8. До температури 1200...2500 °С питомий електричний опір гнотів завжди вище, ніж електрода. Після діапазону 1200...2500 °С ПЕО гнотів стає рівним або менше, ніж тіла електрода. Цей діапазон температур є суто орієнтовним, оскільки ПЕО залежить від складу гнота, завершеності процесів взаємної дифузії в системі гніт–електрод, фактичним станом фізико-хімічних процесів у цій системі тощо.

9. Показано, що взаємна дифузія компонентів у системі гніт–електрод підвищує ізотропність ПЕО цієї системи.

10. Гнотові графітовані електроди забезпечують високу стабільність дуги і покращення всіх основних енергетичних, технологічних та металургійних показників роботи дугових сталеплавильних печей.

11. Гнотові електроди забезпечують зниження рівня шуму печі на 7...10 % і викидів пилу і газів в атмосферу на 7...15 %.

12. Ефективність застосування гнотових електродів не залежить від конструкції дугової печі, від роду струму (постійного або змінного), а також ємності печі.

13. Виробництво гнотових електродів не вимагає значних капітальних витрат і може бути організовано або на підприємстві-виробнику сталі, або на підприємстві-виробнику графітованих електродів.

Список літератури

1. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. (2008) *Производство стали*. Т. 1 Москва, Теплотехник.
2. (2013) «*Steeltime*» — информационный портал о черной и цветной металлургии.
3. Белковский А.Г., Кац Я.Л., Криснянский М.В. (2012) Современное состояние и тенденции развития технологии производства стали в ДСП и их конструкций. *Сталеплавильное производство*, 8, 15–18.
4. Грищенко С.Г., Грановский В.К. (2015) Металлургия мира и Украины в 2015 г.: Проблемы и перспективы. *Международ. научно-техн. конф., Нац. металлург. академия Украины, Днепрпетровск, Украина, 9–11 декабря, 2015*, сс. 23–26.
5. *Анализ рынка и доли рынка графитовых электродов — тенденции роста и прогнозы (2024–2029) «Mordor-Intelligence».*
6. Панов Е.Н., Педченко А.Ю. (2014) Анализ развития печей графитирования Кастнера в условиях потребностей современного рынка. *Технологический аудит и резервы производства*, 4(1), 57–60.
7. Патон Б.Е., Лакомский В.И., Галинич В.И., Мищенко Д.Д. (2011) Фитильные электроды электродуговых печей. *Черные металлы*, 5, 13–15.
8. Bogachenko A.G., Mischenko D.D., Braginets V.I. et al. (2016) Cored graphitized electrodes. Electric arc furnaces of direct current (EAF DC). Saving of electric power. *Proc. of Medovar Memorial Symp., 7–10 June, Kyiv, Ukraine, 2016*, pp. 185–193.
9. Богаченко О.Г., Черняков А.В., Гончаров І.О. (2024) Результати застосування графітованих гнотових електродів на 50-тонній дуговій сталеплавильній печі змінного струму типу ДСВ-50. *Сучасна електрометалургія*, 1, 32–39. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2024.01.04>
10. Bogachenko A.G., Mishchenko D.D., Goncharov I.O. (2023) Efficiency of using cored graphitized electrodes on electric arc furnaces of direct current. *Scienco*, 1, 82–97.
11. Богаченко О.Г., Мищенко Д.Д., Гончаров І.О. та ін. (2023) Застосування графітованих гнотових електродів на дугових сталеплавильних печах постійного струму. *Сучасна електрометалургія*, 1, 53–61. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2023.01.07>
12. 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>
13. Bogachenko A.G., Sidorenko L.A., Goncharov I.O. et al. (2023) Technical-economic indices of operation of AC steel-making furnace with application of cored electrodes. *The Paton Welding J.*, 4, 54–59. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.04.07>

References

1. Dyudkin, D.A., Kisilenko, V.V. (2008) *Steel-making*. Vol. 1. Moscow, Teplotekhnika [in Russian].
2. (2013) «*Steeltime*» — Information portal about ferrous and nonferrous metallurgy.

3. Belkovsky, A.G., Kats, Ya.L., Krisnyanskiy, M.V. (2012) State-of-the-art and trends of development of steel-making technology in arc steel-making furnaces and their design. *Staleplavilnoe Proizvodstvo*, **8**, 15–18 [in Russian].
4. Grishchenko, S.G., Granovsky, V.K. (2015) Metallurgy of the world and Ukraine in 2015. Problems and prospects. In: *Proc. of Int. Sci.-Tekh. Conf., National Metallurg. Academy of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine, 9–11 December, 2015*, 23–26 [in Russian].
5. *Analysis of market and market share of graphitized electrodes — Tendencies of growth and forecasting (2024–2029) «Mordor-Intelligence».*
6. Panov, E.N., Pedchenko, A.Yu. (2014) Analysis of development of Kastner graphitization furnaces under the conditions of modern market demands. *Tekhnologicheskii Audit i Reseruy Proizvodstva*, **4**(1), 57–60 [in Russian].
7. Paton, B.E., Lakomsky, V.I., Galinich, V.I., Mishchenko D.D. (2011) Cored electrodes of electric arc furnaces. *Chyornye Metally*, **5**, 13–15 [in Russian].
8. Bogachenko, A.G., Mishchenko, D.D., Braginets, V.I. et al. (2016) Cored graphitized electrodes. Electric arc furnaces of direct current (EAF DC). Saving of electric power. In: *Proc. of Mevovar Memorial Symp., 7–10 June, Kyiv, Ukraine, 2016*, 185–193 [in Russian].
9. 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 Elektrometal.*, **1**, 32–39 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2024.01.04>
10. Bogachenko, A.G., Mishchenko, D.D., Goncharov, I.O. (2023) Efficiency of using cored graphitized electrodes on electric arc furnaces of direct current. *Scienco*, **1**, 82–97.
11. Bogachenko, O.G., Mishchenko, D.D., Honcharov, I.O. et al. (2023) Application of graphitized wick electrodes in DC arc steel furnaces. *Suchasna Elektrometal.*, **1**, 53–61 [in Ukrainian]. DOI: <https://org/10.37434/sem2023.01.07>
12. 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 Elektrometal.*, **1**, 48–3 [in Ukrainian]. DOI: <https://org.37434/sem/2021.01.06>
13. Bogachenko, A.G., Sidorenko, L.A., Goncharov, I.O. et al. (2023) Technical-economic indices of operation of AC steel-making furnace with application of cored electrodes. *The Paton Welding J.*, **4**, 54–59. DOI: <https://org/10.37434/tpwj2023.04>

COMPOSITE CORED GRAPHITIZED ELECTRODES FOR INDUSTRIAL DC AND AC STEEL-MELTING FURNACES

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

M.M. Gasik², S.G. Kiiko³, I.M. Logozinskyi³, K.M. Gorban³

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

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

²Aalto University, Espoo, Finland. E-mail: michael.gasik@aalto.fi

³PJSC «Dniprospeysstal». 81 Pivdenne Highway, 69000, Zaporizhzhya, Ukraine

The paper presents summary data based on the results of laboratory studies and comprehensive industrial trials of a fundamentally new type of product in electrometallurgy — cores of graphitized electrodes developed at PWI, Ukraine, for dc and ac arc steel-melting furnaces of up to 50 t capacity. It is shown that during the last decade the world production of steel has increased continuously, getting very close to 2 bln tons per year. Approximately 30 % of this volume is produced in arc furnaces, and by the end of this decade it will reach 40 %. It is shown that the cored electrode arc has much lower specific current and power values in all the sections (cathode, column, anode) than the monolithic electrode arc. It was found that voltage drop in the core cathode spot is 2.3...3.3 times smaller than in the monolithic electrode. Cored electrodes improve all the technical-economic characteristics of operation of DC and AC steel-melting furnaces. 13 Ref., 4 Tabl., 9 Fig.

Keywords: arc furnaces, graphitized electrodes, geometrical and power parameters of the arc, electrode work function, specific power, specific electrical resistance

Отримано 29.04.2024

Отримано у переглянутому вигляді 14.05.2024

Прийнято 07.06.2024

