

ЗАСТОСУВАННЯ ГРАФІТОВАНИХ ГНОТОВИХ ЕЛЕКТРОДІВ НА ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

О.Г. Богаченко¹, Д.Д. Міщенко¹, І.О. Гончаров¹, В.І. Брагинець¹, І.О. Нейло¹, Ю.А. Плевако²

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

²ПрАТ «Ферротрейдинг». 69009. м. Запоріжжя, вул. Теплична, 7.

Показано, що ефективним засобом покращення техніко-економічних показників дугових сталеплавильних печей постійного струму є гнотові графітовані електроди, розроблені в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Дослідженнями на промислових печах типу ДСП ПТ-12 встановлено, що дуга гнотового електрода завжди тримається в центрі електрода, чим забезпечується стійкий електричний режим плавки на довгих дугах і низьких напругах джерела живлення. Встановлено, що напруга в прикатодній області, а також діапазон пульсацій струму і напруги гнотової дуги істотно нижче, ніж у звичайного (монолітного) графітованого електрода. Гнотові електроди на дугових сталеплавильних печах постійного струму забезпечують економію активної електроенергії, зниження реактивної потужності, збільшення $\cos \phi$ і продуктивності, зниження чаду легуючих та рівня шуму печі. Бібліогр. 20, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: гнотові графітовані електроди; дугові сталеплавильні печі змінного та постійного струму; електроенергія; вольт-амперна характеристика; пульсації струму та напруги; продуктивність печі

Вступ. У роботах [1–3] зазначено, що характерною особливістю світової металургійної промисловості в останні десятиліття є виробництво сталі, що збільшується рік у рік. Так, з середини 70-х років ХХ століття виробництво сталі збільшилося у 2,8 рази і склало у 2021 р. 1,950 млрд т.

Близько 30 % сталі від зазначеної кількості виплавляється в дугових сталеплавильних печах змінного (ДСП) та постійного (ДСП ПС) струму. При цьому загальна частка електросталі також безперервно збільшується і може досягти 43 % до 2050 р. [4, 5].

Зростання виробництва сталі відбувалося в умовах жорсткої конкуренції на ринку металопродукції і це зумовило бурхливий розвиток різних технологій та відповідного обладнання для виплавки сталі, її позапічної обробки, розливу, переділу тощо. Всі ці розробки мають покращувати такі найважливіші техніко-економічні показники плавки, як витрата електроенергії, вогнетривів і графітованих електродів, збільшувати продуктивність агрегатів за умови забезпечення високої якості металу та задоволення вимог до охорони навколишнього середовища.

Дуже важливим етапом у розвитку виробництва електросталі, що дозволило суттєво покращити техніко-економічні показники та екологічні проблеми цього виробництва, було створення та широке впровадження у промисловості дугових печей постійного струму.

Незаперечними перевагами ДСП ПС є: ефективне перемішування металу й шлаку; висока стабільність горіння дуги та її більш висока темпе-

ратура; порівняно низька витрата електроенергії; низький чад металу та легуючих; дуже низька витрата електродів та вогнетривів; висока і стабільна якість та задовільна собівартість металу. Відзначається також стабільно низький рівень шуму печі, що працює (на 15...20 %); істотне зниження пило- та газовикидів (у 6...10 разів) і рівня перешкод в живильну електромережу.

Основними недоліками ДСП ПС є: наявність одного або кількох подових електродів; відхилення дуги у бік, протилежний джерелу живлення; необхідність використання на потужних печах електродів граничних розмірів — 700, 750 і навіть 810 мм [5–9].

Природно, що при виборі типу печі враховують не тільки зазначені фактори, але й стан і характеристики мереж, забезпеченість шихтою, особливості інфраструктури, вид і призначення продукції та багато іншого. Проте, кількість прихильників ДСП ПС зростає, а деякі з них вважають, що переваги ДСП ПС вже незаперечно доведені [10–14]. Число ДСП ПС безперервно збільшується і в цей час у світі експлуатуються майже 1000 ДСП та 200 ДСП ПС [2, 5, 15, 16].

Методика досліджень і обговорення результатів. Сталеплавильники завжди шукали й намагалися розкрити потенційні можливості електродів, щоб використовувати їх як універсальний інструмент для керування параметрами плавки, і, як наслідок, поліпшення техніко-економічних показників роботи печі в цілому [17].

Щодо ДСП ПС в ІЕЗ ім. Є.О. Патона були розроблені такі багатофункціональні електроди, що

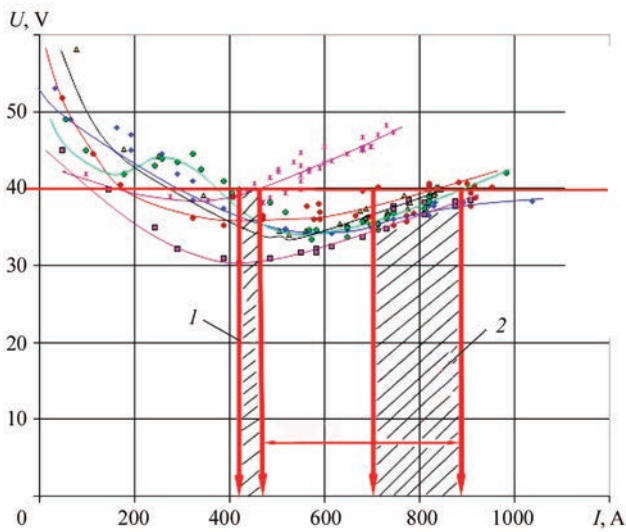


Рис. 1. ВАХ дуг монолітного (1) та гнотового (2) електродів діаметром 50 мм: × — моноліт; ♦ — Г1; ■ — Г2; ▲ — Г3; ● — Г4; ● — Г5; $L_d = 15$ мм, анод — графіт

мають тверду активну вставку або гніт. Ці електроди отримали назву гнотових електродів. Гніт в електроді отримують шляхом свердління в звичайному (монолітному) електроді одного або декількох вертикальних отворів, що заповнюються різними компонентами, в т.ч. містять елементи I та II груп таблиці Менделєєва з низькою роботою виходу електронів. Завдяки цьому в прикатодній області електрода створюються сприятливі термодинамічні умови для іонізації газів стовпа дуги. В результаті принципово змінюються геометричні та енергетичні параметри дуги, зокрема, її вольт-амперні характеристики (ВАХ), змінюється форма робочого торця електрода та інші характеристики, що зумовлюють можливість ефективної оптимізації технологічних та електричних режимів плавки та, як наслідок, покращення техніко-економічних

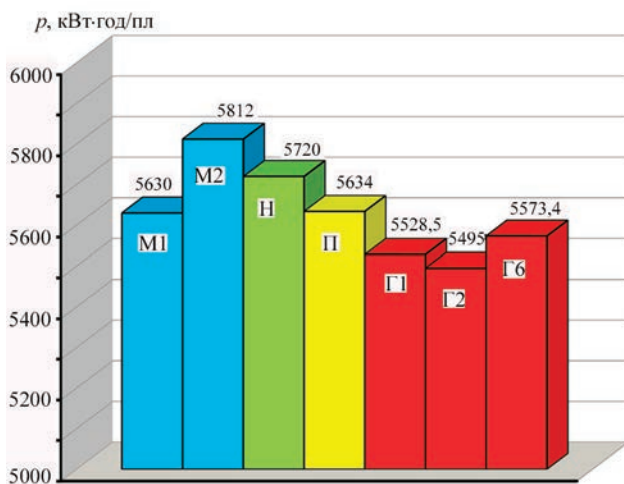


Рис. 2. Питома витрата активної електроенергії на плавках за серійним режимом з використанням монолітних (М1, М2), ніпеля порожнистого (П) та гнотових електродів (Г1, Г2, Г6) (8 ступінь напруги)

показників роботи печі. Про це свідчать результати лабораторних і промислових досліджень, викладених у роботі [18]. Як приклад на рис. 1 наведені ВАХ монолітного та гнотового електродів. Видно, що при рівних напругах дуг (40 В) струм гнотових електродів в 1,8 раза перевищує струм монолітного електрода (900 і 500 А відповідно). Гніт може бути виготовлений в електроді будь-якої якості та розмірів. Об'єктом наших досліджень було обрано ДСП ПС, де відсутня переполаризація дуги і найповніше виявляються властивості гнотового електрода.

У процесі досліджень та випробувань гнотових електродів проведено понад 100 промислових експериментальних плавок, випробувано 10 складів гнотів, 8 експериментальних електричних режимів та ін.

Роботи проводилися на 12-тонній ДСП ПС з набивним кислим футеруванням з використанням графітованих електродів діаметром 350 мм при переплаві відходів FeSiMn. Важливо відзначити, що при застосуванні гнотових електродів конструкція печі не змінюється. Нестабільна якість шихти (значний розкид за хімічним та фракційним складом, а також за вмістом CaO) обумовлювала чималий розкид значень витрати електроенергії, якщо його віднести до однієї тонни придатного феросплаву.

Тому питома витрата активної електроенергії в конкретних умовах виробництва прийнята як витрата на плавку (на вихідну масу шихти, p , кВт·год/пл), економія електроенергії і порівнювані показники прийняті як середні за максимальною кількістю ідентичних плавок.

Програма робіт передбачала: проведення порівняльних випробувань гнотових електродів різного складу та монолітних електродів на серійних режимах (рис. 2); оцінку впливу на витрату електроенергії коротких і довгих дуг у порівнянні з серійним режимом (рис. 3, 4) та зниженої напруги джерела живлення на довгих дугах для гнотових електродів та ніпелів (рис. 5); оцінку зміни реактивної потужності та cosφ для гнотових і монолітних електродів (рис. 6).

З рис. 2 витікає, що гнотові електроди (Г1, Г2 і Г6) на серійних режимах забезпечують зниження витрати активної електроенергії в порівнянні з монолітними (М1 і М2), ніпелями (Н) і порожнистими електродом (П) на 2,4...5,3 %.

Відомо, що ефективним засобом економії електроенергії є робота печі на довгих дугах [19]. Говорячи про довжину дуги стосовно гнотового електрода, треба зауважити, що його торець завжди має форму увігнутої напівсфери, що принципово відрізняє його від монолітного електрода.

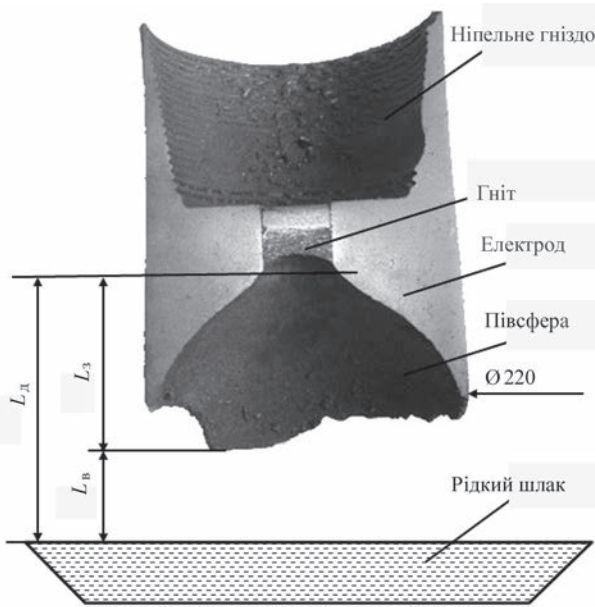


Рис. 3. Макротемплет гнотового електрода з вихідним діаметром 350 мм і складові довжини дуги гнотового електрода (L_d , L_z , L_b)

Тому довжина дуги гнотового електрода (L_d) складається з довжини її відкритої (L_b) і закритої (L_z) частин (рис. 3). При цьому L_d гнотового електрода в 1,3...1,5 рази завжди більше за L_d монолітного електрода при рівних параметрах електричного режиму, що обумовлено наявністю гнота та його складом. У цій роботі за вихідну умову бралася практична рівність довжини дуги монолітного (L_m) електрода та відкритої частини дуги гнотового електрода (L_b) в умовах серійного електричного режиму. Збільшення (або зменшення) довжини дуги L_b на експериментальних режимах здійснювалося шляхом відповідного коригування напруги дуги та струму у другій половині плавки (після другої завалки шихти). Порівняльні результати цих досліджень наведено на рис. 4. Видно, що робота на довгих дугах забезпечує зниження питомої витрати електроенергії на гнотових електродах у середньому на 3,2 %, а порівняно з монолітними електродами на 8,35 % (рис. 2). Треба зазначити, що через низьку стійкість набивної кислоти футеровки, що використовується для переплаву відходів FeSiMn, навіть при порівняно невеликому збільшенні довжини дуги (на 10...15 %), виявилось неможливим достатньою мірою розкрити вплив фактора довгої дуги гнотових електродів на економію електроенергії. Тут є певний резерв у частині економії електроенергії, який, на нашу думку, буде значним при плавленні сталевого брухту на печі з основним футеруванням. Ще одним фактором, що забезпечує економію активної електроенергії на гнотових електродах, стала стійка робота печі

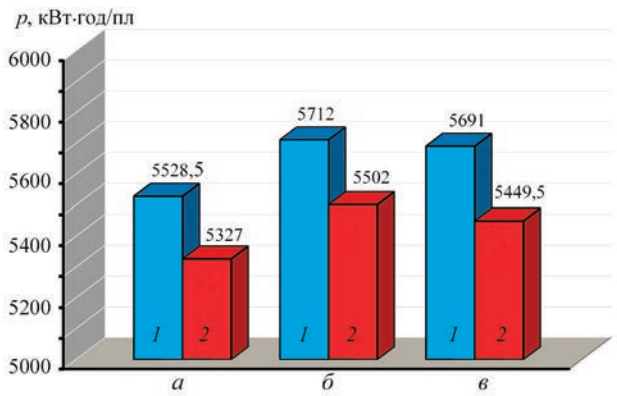


Рис. 4. Питомі витрати активної електроенергії на плавках з гнотовими електродами на короткій (1) та довгій (2) дугах: а — серійна (1) та довга (2) дуги, гніт Г1; б — гніт Г2; в — гніт Г5

на знижених напругах пічного трансформатора (рис. 5). З цього рисунку видно, що плавки на електроді Г2 на довгій дузі та 9 ступені забезпечили економію електроенергії на 2...4 % порівняно з роботою на довгій дузі на 8 ступені (рис. 5, а, б) (серійний режим на монолітних електродах не стійкий на 9 ступені напруги). Така сама залежність спостерігалася на інших гнотових електродах і ніпелях (рис. 5, в). Важливо зазначити, що робота печі на довгих дугах забезпечила найвищу продуктивність, що визначається часом плавки, в середньому — 2,11 год як на 8-ій (531 В), так і на 9-ій (467 В) ступенях напруги без втрати температури металу перед зливом. На дослідних режимах, що передбачають короткі дуги, час плавки збільшився в середньому до 2,28 год, тобто на 7,5 %. Більш того, гнотові електроди забезпечили стійку роботу печі та економію електроенергії на 2,5 % і на 10-ій (394 В) ступені. Ці дані чітко свідчать про високу стабільність дуги гнотових електродів та експериментальних електричних режимів, що обумовлено ефективною роботою компонентів

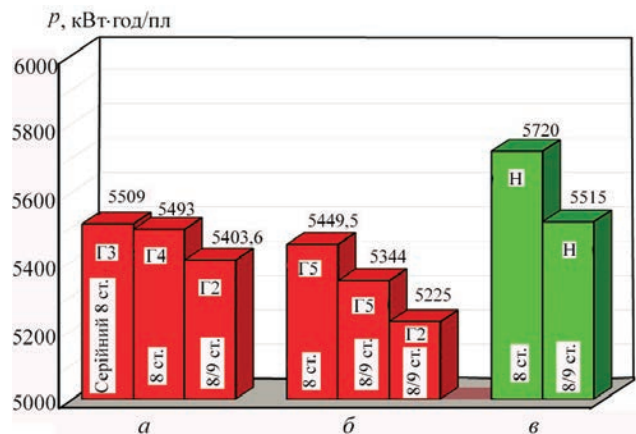


Рис. 5. Питомі витрати активної електроенергії на 8 та 9 ступенях напруги: а — гнотові електроди Г2 (V серія), Г3 і Г4 (IV серія) (склад F2); б — гнотовий електрод Г5 (IV серія) (склад F3); в — ніпелі (серійний режим)

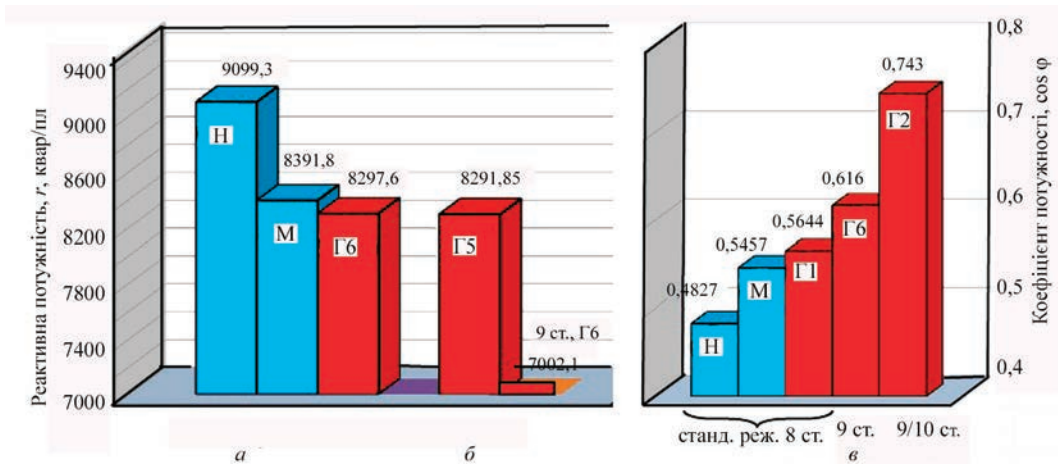


Рис. 6. Порівняльні показники зниження реактивної потужності і $\cos \varphi$: а — стандартний режим, ніпель № 5 (Н), монолітні електроди (М) (плавка 3485...3487 за Батовським) та гнотовий електрод Г6 (плавка 3732...3735); б — стандартний режим, Г5 та дослідний режим, № 8 на 9 ступені напруги, Г6; в — $\cos \varphi$ на стандартному режимі 8 ступеня, на дослідному режимі 9 ступеня, на дослідному режимі 9/10 ступеня

гнота. Таким чином, гнотові графітовані електроди при роботі на довгих дугах і низьких ступенях напруги джерела живлення можуть забезпечити до 8,35 % економії активної електроенергії та збільшення продуктивності печі на 7,5 %.

Гнотові електроди забезпечують також суттєве зниження реактивної потужності (рис. 6). Вже на плавці за стандартним режимом відбувається зниження реактивної потужності на гнотових електродах у порівнянні з ніпелями та монолітними електродами на 8,8 та 1,1 % відповідно (рис. 6, а). Ще більше знижується реактивна потужність при використанні гнотових електродів при зниженій напрузі трансформатора (9 ступінь) та довгою дугою в порівнянні з гнотовим електродом на стандартному режимі (рис. 6, б). А порівняно з ніпелями на стандартному режимі цей показник знижується на 23 %.

Гнотові електроди також зумовлюють зростання $\cos \varphi$ (рис. 6, в). З рисунка випливає, що $\cos \varphi$ зростає з 0,4827 (8 ступінь) при плавленні на ніпелях за стандартним режимом до 0,743 при плавці на гнотових електродах за дослідним режимом на 10 ступені трансформатора.

Отже, при роботі на гнотових електродах оптимальних складів, низьких напругах трансформатора та довгих дугах забезпечується економія активної електроенергії до 8,35 %, зниження реактивної потужності на 23 % і збільшення $\cos \varphi$ з 0,483 до 0,743.

Для забезпечення фактів економії активної електроенергії та зниження реактивної потужності розглянемо ВАХ дуг монолітних та гнотових електродів (рис. 7). Вказані ВАХ отримані на модельних електродах діаметром 50 мм для монолітного та п'яти експериментальних складів гнота.

На промислових ДСП ПТ-12 плавки ведуться на максимальному струмі (17,1...17,3 кА) з використанням монолітних та гнотових графітованих електродів з вихідним діаметром 350 мм. На установці (моделі) з електродами діаметром 50 мм зазначений струм відповідає струму 345...350 А. Як видно з рис. 7, при використанні гнотових електродів (залежно від їх складу) один і той самий струм (400 А) досягається при значно меншій напрузі (32 В), ніж у разі монолітного електрода (62 В). Таке зниження напруги забезпечується завдяки наявності в матеріалі гнота речовин з низькою роботою виходу електронів. Цим пояснюється стійка робота дуги гнотового електрода на низьких напругах трансформатора (9 і 10 ступені), тому що має місце струм, створюваний компонентами гнотів (струм емітерів).

На рис. 1 цей струм становить 400 А. Одним з найважливіших наслідків роботи компонентів гно-

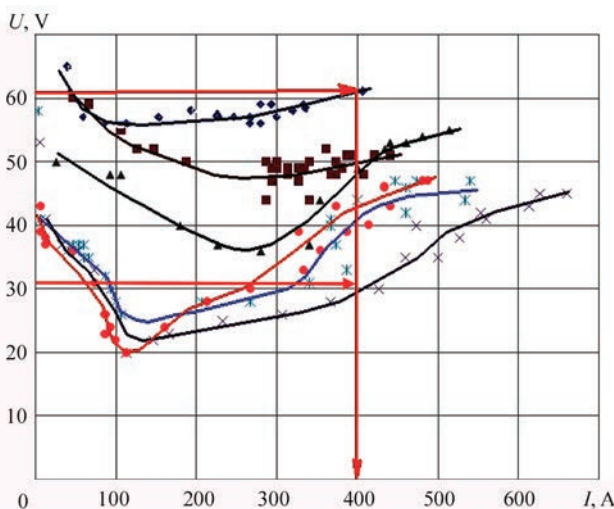


Рис. 7. ВАХ дуг, отримані на монолітному та гнотовому електродах, анод-мідь: ♦ — М; ■ — Г1; ▲ — Г2; × — Г3; * — Г4; ● — Г5

Таблиця 1. Електричні параметри дуг при довжині 15 мм*

Параметри	Моноліт		Гніт Г3		Гніт Г4		Гніт Г5	
		% від P_d		% від P_d		% від P_d		% від P_d
Загальна напруга на дузі (U_d), В	52	—	36	—	41	—	39	—
Катодна напруга (U_k), В	18	—	6	—	7,5	—	9	—
Напруга стовпа дуги (U_c), В	20	—	20	—	20,5	—	19	—
Анодна напруга (U_a), В	14	—	10	—	13	—	11	—
Струм дуги (I_d), А	300	—	420	—	320	—	313	—
Загальна потужність (P_d), Вт	15608	—	15128	—	13120	—	12226	—
Потужність катода (P_k), Вт	5403	35	2521	17	2400	19	2821	23
Потужність стовпа (P_c), Вт	6003	38	8404	56	6560	51	5956	49
Потужність анода (P_a), Вт	4202	27	4202	28	4160	30	3448	28

*Наведено середні дані за трьома вимірами.

та (емітерів) є суттєве зменшення падіння напруги на катодній плямі гнотових електродів (табл. 1).

Як впливає з даних табл. 1, має місце одна з важливих відмінностей у параметрах дуг — падіння напруги на катодній плямі гнота в 2...3 рази нижче, ніж у дуги монолітного електрода. Зазначена особливість дуги гнота присутня як при рівних довжинах дуг, так і при рівних напругах дуг. Це зумовлює істотне зниження теплових втрат в прикатодній області гнотового електрода. У сукупності зі стабільною прив'язкою дуги на гноті та стабільним електричним режимом плавки це обумовлює зазначену вище економію активної електроенергії.

Про реактивну потужність. На перший погляд виглядає досить дивним факт таких високих показників реактивної потужності (сумірних з активною потужністю) в електричному ланцюзі випрямленого струму. Разом з тим відомо, що в електричних ланцюгах, що містять накопичувачі енергії (дросель, конденсатор) та нелінійний елемент, можуть виникати автоколивання або так званий детермінований хаос [20]. Таким елементом ланцюга в ДСП ПС є електрична дуга, що має властивості нелінійного активного (нереактивного) накопичувача енергії. Дослідження осцилограм напруги та струму, які були записані на промислових ДСП ПТ-12 для монолітного та гнотового електродів на стандартних режимах, показали, що амплітуда пульсацій як струму, так і напруги (особливо напруги) значно більше у разі монолітного електрода, аж до переполяризації напруги. Було встановлено, що діапазон пульсацій напруги та струму у гнотових електродів на 15 і 31 % відповідно менше, ніж у монолітних.

Зменшення амплітуди пульсацій означає зменшення частки змінної складової у випрямленому

струмі, що обумовлює зниження реактивної потужності до 23 %.

Для пояснення впливу активуючих компонентів гнота на рівень пульсації електричних параметрів дуги слід знову повернутися до ВАХ дуг. Для наочності залежності $U = f(I)$, що наведені на рис. 7, перерахуємо в залежність опору дуги від струму $R = f(I)$. Експериментальні виміри були оброблені також за допомогою пакета комп'ютерної математики Scilab і отримані математичні залежності $R = f(I)$ для кожного розглянутого випадку. Результати математичної обробки експериментальних вимірів наведені на рис. 8. Діапазону номінальних струмів плавки у промисловій печі ДСП ПС-12 (14,9...17,8 А) у модельних умовах на

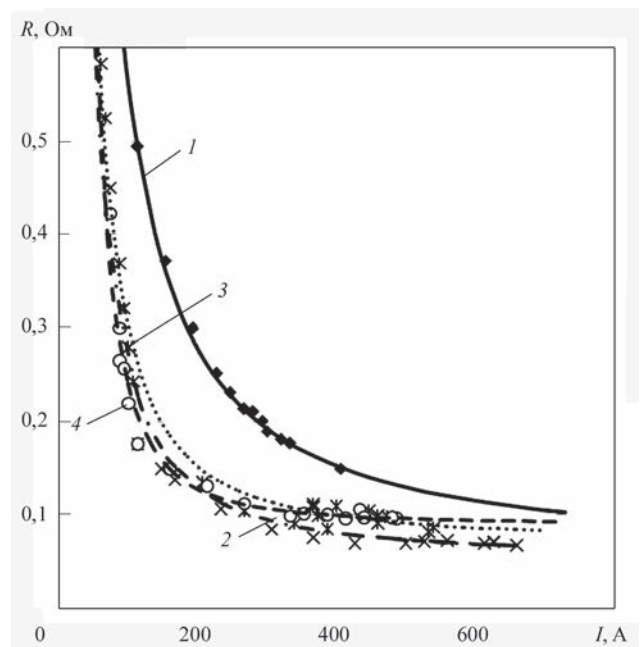


Рис. 8. Залежність опору дуги від струму ($R = f(I)$) для монолітного та гнотових електродів: 1 — М; 2 — Г3; 3 — Г4; 4 — Г5

Таблиця 2. Результати математичної обробки осцилограм дуг на модельних електродах діаметром 50 мм

Електрод	Рівняння залежності $R = f(I)$, Ом	Рівняння похідної dR/dI , Ом/А	Значення dR/dI при $I = 350$ А, Ом/А
Монолітний	$R(I) = 128,56 \cdot I^{-1.2} + 0,056$	$dR/dI = -154,274 \cdot I^{-2.2}$	$-3,903 \cdot 10^{-4}$
Г3	$R(I) = 208,52 \cdot I^{-1.5} + 0,055$	$dR/dI = -312,777 \cdot I^{-2.5}$	$-1,365 \cdot 10^{-4}$
Г4	$R(I) = 230,52 \cdot I^{-1.5} + 0,071$	$dR/dI = -345,783 \cdot I^{-2.5}$	$-1,509 \cdot 10^{-4}$
Г5	$R(I) = 1512,84 \cdot I^{-2} + 0,090$	$dR/dI = -3025,671 \cdot I^{-3}$	$-0,706 \cdot 10^{-4}$

електродах діаметром 50 мм відповідають струми 345...350 А. У табл. 2 наведено деякі результати математичної обробки осцилограм дуг на модельних електродах.

Показником нелінійності ВАХ для заданого значення струму є кут нахилу щодо кривої залежності опору дуги від струму $R = f(I)$. Значення тангенса цього кута дорівнює першій похідній dR/dI у цій точці. Лінійна залежність ВАХ характеризується сталістю опору, тобто горизонтальною лінією залежності опору від струму.

Значення похідної dR/dI для струму 345...350 А можна вважати показником нелінійності ВАХ. Чим більше dR/dI відмінно від нуля, тим більше ВАХ відрізняється від лінійної залежності і, як видно з наведених даних, у гнотів цей показник ближче до нуля, ніж у монолітного електрода. Іншими словами, чим ближче ВАХ дуги знаходиться до лінійної залежності в робочому діапазоні струмів, тим менше пульсації струму та напруги, що зумовлюють зниження реактивної потужності під час роботи на гнотових електродах. Тут же меншою мірою виражене явище автоколивань в електричному ланцюзі ДСП ПС.

Наведені вище розрахункові, експериментальні та практичні дані свідчать про явні енергетичні переваги гнотової дуги. Ці дані отримані при переплаві відходів 30 % FeSiMn, тобто порівняно простої, однорідної шихти. Це стало переконливою основою використовувати гнотові електроди для переплаву складнішої, багатofракційної, важкої шихти. Такою шихтою був каталізатор — продукт очищення нафти. Основу його становив Al_2O_3 . У каталізаторі міститься також велика кількість нікелю, молібдену, ванадію. Особливістю є високий вміст сірки (до 4...6 %) та високий залишковий вміст нафтопродуктів. Основна мета 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 цьо-

му тлі перевірка ефективності роботи гнотових електродів представляла великий інтерес. Робота включала три етапи:

етап 1 — переплав власне каталізатора з отриманням ванадійвмісткого шлаку і металевої фази (зливків), що містять Ni та Mo;

етап 2 — рафінування зливків та отримання продукту з максимально високим вмістом Ni та Mo;

етап 3 — отримання ферованадію.

Техніко-економічні показники (продуктивність, кг/год; вихід металевої фази (зменшення чаду), %; витрата електроенергії, кВт·год/т) переплаву каталізатора по етапах із застосуванням монолітних (М) та гнотових (Г) електродів представлені на рис. 9. Стрілки вказують порівнювані показники.

Наведені дані свідчать насамперед про те, що гнотові електроди на всіх етапах переплаву каталізатора та його продуктів мають суттєві переваги в порівнянні з монолітними електродами. Ці переваги мають великий діапазон значень (рис. 9, а–в), що пояснюється двома чинниками: перший — відсутність належної підготовки шихти (каталізатора) і, як наслідок, нестабільність електричних та технологічних режимів плавки; другий — показники, що порівнюються, багато в чому визначаються складом гнотів.

Дані, наведені на рис. 9, а–в, показують наступне: продуктивність печі при переплаві каталізатора збільшується на 21,3...23,6 %; збільшення виходу металевої фази (зниження чаду Ni, Mo, Fe) становить 1...9 %; зниження питомої витрати електроенергії досягає 16,6...30,0 %. Стабільно вищі показники забезпечені на плавках із застосуванням гнотів складу Г11.

При переплаві металевої фази (зливків) забезпечуються такі показники (рис. 9, г–е): продуктивність печі зростає до 96...108 %; вихід металевої фази збільшується на 1,9...10,3 % і економія електроенергії становить 1,3...2,8 % на гнотових електродах.

При виплавці ферованадію з використанням гнотів Г12 (рис. 9, ж–и) продуктивність печі також зростає на 4,2 %; забезпечується зниження чаду ванадію до 17 % при виплавці 50 % ферованадію, економія електроенергії становить при цьому 7,1 %.

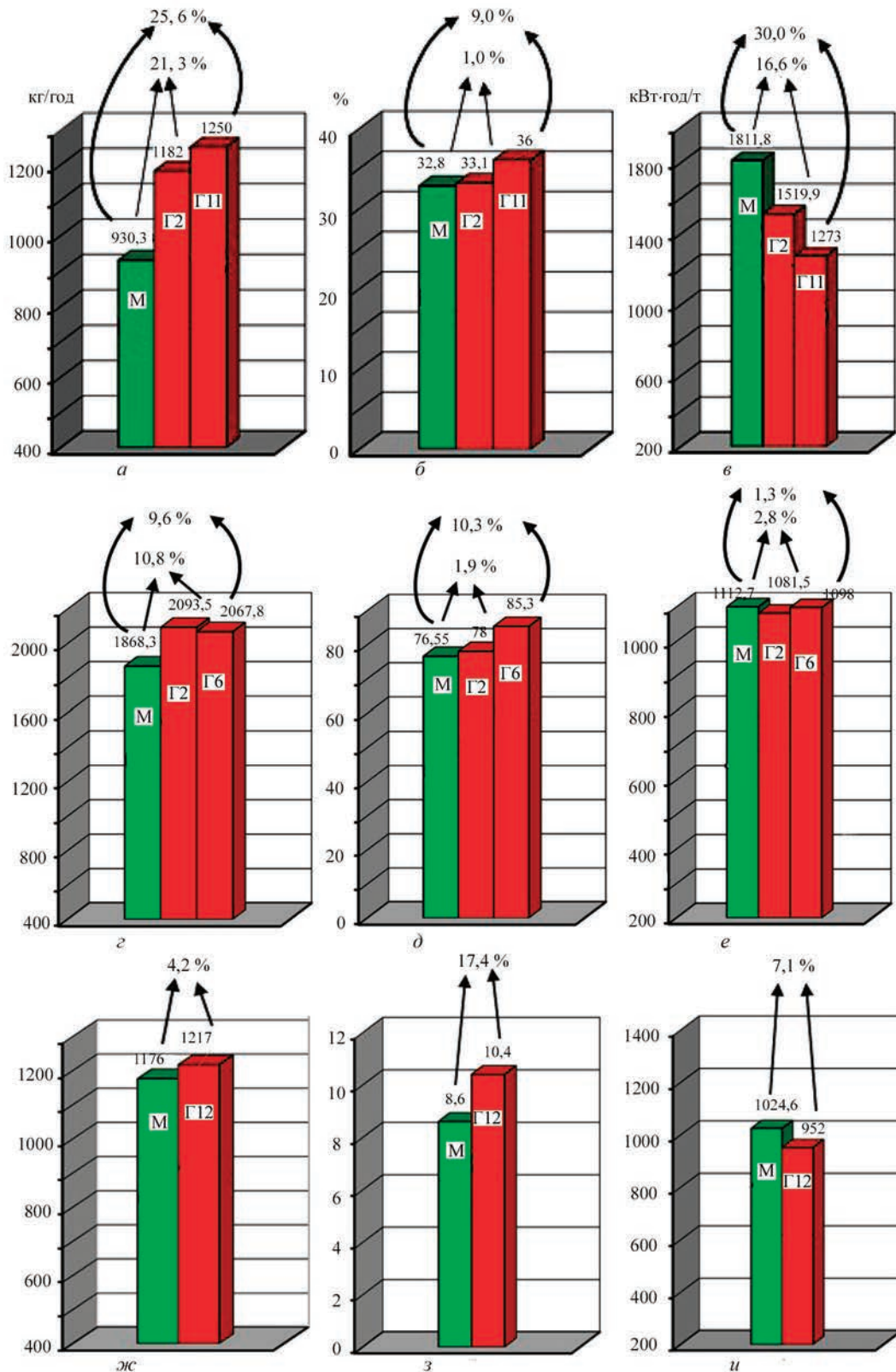


Рис. 9. Продуктивність печі (а, г, ж), вихід металевої фази (зниження чадy Fe, Ni, Mo) (б, д, з) та витрата електроенергії (в, е, и) при переплаві: каталізатора із застосуванням монолітних (М) та гнотових (Г2 та Г11) електродів (етап 1); металевої фази (зливків) із застосуванням монолітних (М) та гнотових (Г2 та Г6) електродів (етап 2); виплавці ферованадію при використанні монолітних (М) та гнотових (Г12) електродів (етап 3)

У процесі дослідних плавок на печі ДСП ПС-12 було встановлено, що істотною перевагою гнотових електродів є і те, що при їх застосуванні у 2,0...2,5 рази знижується розкид часу плавок, отже

забезпечується висока стабільність електричного і теплового режимів роботи печі та повніший перебіг фізико-хімічних процесів.

Важливою відмінністю гнотових електродів є те, що робочий торець такого електрода під час плавки завжди має форму увігнутої напівсфери, незалежно від складу гноту та параметрів електричного режиму. Ця напівсфера впливає на два важливі технологічні фактори. По-перше, вона може концентрувати у собі 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. Тому, припускаємо, що має знизитися на 20...30 % витрата вогнетривів, зменшиться кількість ремонтів печі і зрости її загальна продуктивність.

Підтверджено також, що гнотова дуга обумовлює зниження рівня шуму при роботі ДСП ПС-12 на 10...12 %.

Наведені у статті дані послужили підставою для робіт з використання гнотових електродів на сталеплавильних дугових печах змінного струму.

Висновки

1. Зазначено, що понад 30 % світового виробництва сталі виплавляється в дугових печах постійного (ДСП ПС) та змінного струму (ДСП).

2. Ефективним засобом покращення техніко-економічних показників ДСП ПС є застосування гнотових графітованих електродів, розроблених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. Гнотові електроди мають у своєму складі компоненти з низькою роботою виходу електронів, що створює сприятливі термодинамічні умови для іонізації газів стовпа дуги в прикатодній області.

3. Встановлено, що дуга гнотового електрода завжди стійко тримається на гноті та не мігрує по торцю електрода, характеризується високою стабільністю при великій довжині та на низьких напругах джерела живлення.

4. Встановлено, що за рівних напруг струм дуги гнотового електрода в 1,8 рази більше струму монолітного електрода.

5. Встановлено, що падіння напруги в прикатодній області гнотового електрода у 2...3 рази менше, ніж у монолітного, що істотно знижує втрати енергії (тепла) в цій частині дуги.

6. Показано, що амплітуда коливань напруги та струму дуги гнотового електрода нижче в середньому на 15 та 31 % відповідно, порівняно з дугою монолітного електрода.

7. Відповідно до особливостей і параметрів дуги гнотових електродів при переplаві відходів

FeSiMn на промисловій ДСП ПС забезпечуються: стабільний електричний режим; економія активної електроенергії до 8,35 % під час роботи на подовжених дугах; зниження реактивної потужності до 23 %; підвищення $\cos \phi$ з 0,48 до 0,74; збільшення продуктивності печі на 7,5 %; скорочення розкиду часу плавки у 2,0...2,5 рази.

8. При переplаві каталізатора та його похідних (зливки, ванадійвмісткий шлак, виплавка ферованадію) гнотові електроди залежно від їх складу забезпечують: збільшення продуктивності печі до 25,6 %; зниження чаду Ni та Mo при переplаві та рафінуванні зливок на 10,3 %; зниження чаду ванадію на 17,4 % при виплавці ферованадію; зниження витрати електроенергії на 30 %.

9. Отримані результати дали підставу для проведення робіт із застосування гнотових електродів на дугових печах змінного струму.

Список літератури

1. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. (2008) *Производство стали*. Т. 1. Москва, Теплотехник.
2. (2013) «*Steeltime*». Информац. 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. *Международная научно-техн. конференция. Нац. металлург. академия Украины, Днепрпетровск, Украина, 9–11 декабря, 2015*, сс. 23–26.
5. Shatokha V. (2015) Review of core support capabilities of the equipment SoS analysis and evaluation. *Proc. of 2nd Inter. Conf. on Advanced in Metallurgical Processes and Material (Kyiv, Ukraine, June 3–5 2015)*.
6. Миляев А.Ф., Кадников С.В. (2002) Выбор типа и емкости агрегатов для выплавки чугуна и стали в литейных цехах. *Электрометаллургия*, **11**, 21–24.
7. Дюдкин Д.А., Бать С.Ю., Гринберг С.Е., Маринцев С.Н. (2003) *Производство стали на агрегате ковша-печь*. Донецк, ООО «Юго-Восток».
8. Ramires M., Alexis I., Trarage G. et al. (2002) Перемешивание расплава в дуговой печи постоянного тока. *Новости черной металлургии за рубежом*, **3**, 54–57.
9. Савицки А. (2000) О выборе рациональной конструкции ДСП постоянного тока. *Электрометаллургия*, **8**, 13–19.
10. (2015) *Классификация современных дуговых электропечей. Дуговые печи переменного и постоянного тока*. Украинская Ассоциация сталеплавильщиков. Информац. портал.
11. Еланский Д.Г. (2001) Тенденции развития электросталеплавильного производства. *Электрометаллургия*, **5**, 3–18.
12. Платонов Б.П., Котельников О.И. (1996) Исследование пылегазовых выбросов дуговых печей постоянного и переменного тока. *Литейное производство*, **1**, 24–27.
13. Володин А.М., Богдановский А.С., Малиновский В.С. (2004) Результаты работы печи постоянного тока ДСП ПТУ-20 на АООТ «Тяжпрессмаш». *Там же*, **4**, 31–35.

14. Макаров А.Н., Шимко М.Б., Острик В.В. (2004) Анализ основных технико-экономических показателей работы дуговых печей постоянного и переменного тока. *Электротехнология*, **3**, 5–9.
15. Boom Rob (2015) Breakthrough development in ironmaking and steelmaking: collaboration or competition. *Proc. of 2nd Inter. Conf. on Advanced in Metallurgical Processes and Materials (Kyiv, Ukraine, June 3–5 2015)*.
16. Тищенко П.И., Тимошенко С.Н., Онищенко С.П. (2015) Подовые электроды ДСП ПТ. *Обзор основных технических решений*. ДонНТУ, ЧП «Фирма «РОУД», Украинская Ассоциация сталеплавильщиков. Информац. портал о черной и цветной металлургии, Донецк, Украина.
17. Патон Б.Е., Лакомский В.И., Галинич В.И. и др. (2011) Фитильные электроды электродуговых печей. *Черные металлы*, **5**, 13–15.
18. 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 электротехнология*, **1**, 58–64.
19. Казачков Е.А., Чепурной А.Д. (2005) Пути повышения производительности дуговых сталеплавильных печей. *Вісник приазовського державного технічного університету*, **15**, 1–5.
20. Сидорец В.Н., Пентегов И.В. (2013) *Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой*. Киев, Международная ассоциация «Сварка».
6. Milyaev, A.F., Kadnikov, S.V. (2002) Choice of type and capacity of cast iron and steel in foundry. *Elektrometallurgiya*, **11**, 21–24 [in Russian].
7. Dyudkin, D.A., Bat, S.Yu., Gri8nberg, S.E., Marintsev, S.N. (2003) *Steel production at ladle-furnace unit*. Donetsk, OOO Yugovostok [in Russian].
8. Ramires, M., Alexis, I., Trapage, G. et al. (2002) Stirring of melt in direct current arc furnace. *Novosti Chyornoj Metallurgii za Rubezhom*, **3**, 54–57 [in Russian].
9. Savitsky, A. (2000) On choice of rational design of direct current DSP. *Elektrometallurgiya*, **8**, 13–19 [in Russian].
10. (2015) *Classification of modern arc electric furnaces. Direct and alternating current arc furnaces*. Ukrainian Association of steelmakers. Inform. Portal [in Russian].
11. Elansky, D.G. (2001) Tendencies of development of electric steelmaking. *Elektrometallurgiya*, **5**, 3–18 [in Russian].
12. Platonov, B.P., Kotelnikov, O.I. (1996) Examination of dust-gas emissions of direct and alternating current arc furnaces. *Litejnoe Proizvodstvo*, **1**, 24–27 [in Russian].
13. Volodin, A.M., Bogdanovsky, A.S., Malinovsky, V.S. (2004) Results of operation of DC furnace DS PTU-20 at OJSC “Tyazhpresmash”. *Ibid.*, **4**, 31–35 [in Russian].
14. Makarov, A.N., Shimko, M.B., Ostriker, V.V. (2004) Analysis of the main technical and economic indices of DC and AC arc furnace operation. *Elektrometallurgiya*, **3**, 5–9 [in Russian].
15. Boom Rob (2015) Breakthrough development in ironmaking and steelmaking: Collaboration or competition. *Proc. of 2nd Inter. Conf. on Advanced in Metallurgical Processes and Materials (Kyiv, Ukraine, June 3–5 2015)*.
16. Tishchenko, P.I., Timoshenko, S.N., Onishchenko, S.P. (2015) *Hearth electrodes DSP PT. Review of the main technical solutions*. DonNTU, PE ROUD Society. Ukrainian Association of steelmakers. Inform. Portal on Ferrous and Nonferrous Metallurgy. Donetsk, Ukraine [in Russian].
17. Paton, B.E., Lakomsky, V.I., Galinich, V.I. et al. (2011) Cored electrodes of electric arc furnaces. *Chiornye Metally*, **5**, 13–15 [in Russian].
18. 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.
19. Kazachkov, E.A., Chepurnoj, A.D. (2005) Ways to increase the productivity of arc steel furnaces. *Visnyk Pryazov. DTU*, **15**, 1–5 [in Russian].
20. Sidorets, V.N., Pentegov, I.V. (2013) *Deterministic chaos in non-linear circuits with an electric arc*. Kyiv, IAW [in Russian].

References

1. Dyudkin, D.A., Kisilenko, V.V. (2008) *Steelmaking*. Vol. 1. Moscow, Teplotekhnik [in Russian].
2. (2013) «*Steeltime*». Data portal on ferrous and non-ferrous metallurgy.
3. Belkovsky, A.G., Kats, Ya.L., Krisnyansky, M.V. (2012) State-of-the-art and tendencies of development of steel production technology in DSP and their structures. *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. *Int. Sci.-Tech. Conf. of National Metallurgical Academy of Ukraine (Ukraine, Dnipro, 9–11 December, 2015)*, 23–26 [in Russian].
5. Shatokha V. (2015) Review of core support capabilities of the equipment SoS analysis and evaluation. *Proc. of 2nd Inter. Conf. on Advanced in Metallurgical Processes and Material (Kyiv, Ukraine, June 3–5 2015)*.

APPLICATION OF GRAPHITIZED WICK ELECTRODES IN DC ARC STEEL FURNACES

O.G. Bogachenko¹, D.D. Mishchenko¹, I.O. Honcharov¹, V.I. Braginets¹, I.O. Neilo¹, Yu.A. Plevako²

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

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

²PJSC «Ferrotrading», 7 Teplychna str., 69009, Zaporizhzhya.

It is shown that wick graphitized electrodes are an effective means of improvement of technical and economic parameters of DC arc steel furnaces. These electrodes were developed at the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. Investigations in industrial furnaces of DSP PT-12 type showed that the wick electrode arc always stays in the electrode center, thus providing a stable electric mode of melting with long arcs and low voltages of the power source. It was established that voltage in the cathode area, as well as the ripple ranges of the current and voltage of the wick arc are essentially lower than for the regular (monolithic) graphitized electrode. In DC arc steel furnaces wick electrodes provide saving of active power, lowering of reactive power, increase of $\cos \varphi$ and efficiency, lowering of alloying element burnout and furnace noise level. Ref. 20, Tabl. 2, Fig. 9.

Key words: wick graphitized electrodes; AC and DC arc steel furnaces; electric power; volt-ampere characteristic; current and voltage ripple; furnace performance

Надійшла до редакції 20.02.2023