

ЗАСТОСУВАННЯ ГРАФІТОВАНИХ ГНотовИХ ЕЛЕКТРОДІВ НА 50-ТОННІЙ ДУГОВІЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНІЙ ПЕЧІ ЗМІННОГО СТРУМУ ТИПУ ДСВ-50

О.Г. Богаченко¹, А.В. Черняков¹, І.О. Гончаров¹,
С.Г. Кійко², І.М. Логозинський², Б.А. Левін², А.Г. Федьков², К.М. Горбань²

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

²ПрАТ «Дніпроспецсталь». 69008, м. Запоріжжя, Південне Шоце, 81. E-mail: info@dss.com.ua

На 50-тонній печі типу ДСВ-50 трифазного змінного струму проведені експериментальні плавки із застосуванням графітованих гнотових електродів. Виплавляли низьколеговані, високоміцні леговані і інструментальні сталі дванадцяти марок. Випробувані гноти чотирьох складів (F_{18} , F_{22} , F_{23} і F_{27}). Плавки проводили в безперервному режимі плавка на плавку. Показано, що застосування гнотових електродів забезпечило: зниження питомої витрати графітованих електродів на 16,1...31,4 %; економію активної електроенергії у середньому на 16,5 %; збільшення продуктивності печі на 18...27 %; зниження вмісту азоту в сталі у середньому на 20 %; зниження вгугару легуючих елементів (Cr, Ni, V, Mo і ін.) на 8,3...14,7 %; зниження загального вгугару шихти на 3,5...9,6 %. Показано, що в порівнянні з техніко-економічними показниками, отриманими на печі ДС-6Н1, збільшення ємності печі з 6 до 50 т не знизило ефективність застосування гнотових електродів на дугових печах змінного струму, тобто гнотові графітовані електроди можна успішно використовувати на дугових печах необмеженої ємності. Бібліогр. 19, табл. 5, рис. 3.

Ключові слова: гнотові електроди, дугові печі, електрична дуга, подовжені дуги, енергозбереження

Вступ. В останні десятиліття світова металургія характеризується постійним зростанням виробництва сталі [1]. Так, у 2012 р. загальне виробництво сталі становило 1,517 млрд т, у 2017 р. — 1,691 млрд т, у 2019 р. досягло вже 1,87 млрд т, у 2021 р. — 1,950 млрд т. При цьому близько третини його загального обсягу — електросталь. Частка вироблення електросталі постійно зростає і наразі становить у Європі близько 42 %, у США вона перевищує 60 %, у Китаї та Азії — близько 20 %. У країнах, де чорна металургія виникла порівняно недавно (Люксембург, Індонезія, Саудівська Аравія), сталь виробляють тільки в дугових електропечах змінного і постійного струму. Важливо також відзначити, що в металургійній промисловості з метою вирішення проблем екологічної безпеки перевага надається електрометалургійним технологіям [2].

Зростання виробництва електросталі відбувається одночасно з безперервним удосконаленням конструкції печей, джерел живлення, підготовки шихти, режимів плавки, позапічної обробки сталі, термообробки тощо [3]. Однією з основних цілей цих розробок є зниження витрат електроенергії і графітованих електродів в процесі плавлення [4].

Графітовані електроди є одним з основних елементів дугових печей. Вони активно впливають на всі процеси в печах. Однією з головних проблем

використання графітованих електродів є зменшення їх витрати в процесі плавлення [5]. Для вирішення цієї проблеми досить успішно використовують електроди із захисними покриттями, які знижують інтенсивність бокового окислення [6]. Іншим засобом зменшення витрати графітованих електродів є використання випарного охолодження [7].

Відомі успішні дослідницькі роботи, в яких властивості електродів покращували шляхом нанесення на їх поверхню функціональних шарів [8]. Однак у промисловості такі електроди не використовувалися через їх високу вартість.

Успішно випробувано порожнисті електроди, які забезпечили стабілізацію дуги, збільшення продуктивності печі та $\cos \phi$, економію електроенергії тощо [9]. Проте порожнина в електроді викликає різке збільшення його втрат (на 20...25 %) порівняно зі звичайними монолітними електродами. З цієї причини порожнисті електроди не знайшли широкого застосування в промисловості.

Досить велика увага приділяється вивченню властивостей дуг і можливостей їх стабілізації з метою ефективного поліпшення техніко-економічних показників експлуатації дугових печей [10].

Досить позитивні результати отримано від використання в електродугових печах постійного струму графітованих, гнотових електродів, розроблених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона [11]. Нині пер-

О.Г. Богаченко — <https://orcid.org/0000-0002-3306-6626>, І.О. Гончаров — <https://orcid.org/0000-0003-2915-0435>,

С.Г. Кійко — <https://orcid.org/0000-0002-1161-5866>

спективним видається продовження робіт із застосування графітованих гнотових електродів в електродугових печах змінного струму.

Мета роботи — визначити технічну й економічну ефективність застосування гнотових електродів на дугових сталеплавильних печах змінного струму і оцінити вплив на неї масштабного фактора (порівняння техніко-економічних показників при роботі на 6- та 50-тонних печах).

Методи дослідження. Програма робіт включала оцінку впливу масштабного фактора, роботу печі у безперервному режимі (плавка на плавку) протягом 8 діб, роботу печі на подовжених дугах, контроль параметрів електричних та технологічних режимів плавки та ін. Для цього було виготовлено 24 електроди діаметром 508 мм з гнотовими вставками складами F_{18} , F_{22} , F_{23} і F_{27}^* . Для коректного порівняння результатів плавки проводили, в основному, на штатних електричних режимах. Проводили також записи осцилограм струму і напруги плавки, частина яких виконана на довгих дугах та знижених струмах. Усього було виплавлено 1968 т вуглецевих, низьколегованих високоміцних і легованих інструментальних сталей.

Основні результати, отримані при застосуванні гнотових електродів на 6-тонній печі типу ДС-6Н1. Впродовж 2018...2021 рр. фахівці ІЕЗ ім. Є.О. Патона і ПрАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» ім. А.М. Кузьміна» вперше у світовій практиці електрометалургії провели кілька серій дослідних плавки (більше 70) із застосуванням графітованих гнотових електродів на 6-тонній трифазній дуговій сталеплавильній печі змінного струму типу ДС-6Н1. Переплавляли відходи абразивного зачищення швидкорізальних сталей і жароміцних сплавів та прокатної обрізі вуглецевих і шарикопідшипникових сталей типу ШХ15. Перші ж плавки на штатних електричних

режимах, прийнятих для стандартних (монолітних) електродів, показали, що дуга гнотового електрода в порівнянні з дугою монолітного електрода суттєво відрізняється своїми геометричними і енергетичними параметрами, а також дуже високою стабільністю (рис. 1). Гнотова дуга завжди розосереджена, просторово стійка, є дуже стабільна в широкому діапазоні довжин і електричних режимів [12–15].

Зазначені фактори обумовлюють значно менші ніж у дуги монолітного електрода показники струму й потужності, віднесені до одиниці поверхні або обсягу дуги. Це наочно видно з даних табл. 1, отриманих на 12-тонній сталеплавильній печі постійного струму при однакових напругах на дугах (220 В) і однаковому струмі (11000 А) для монолітного й гнотового електродів. Досить відзначити, що щільність струму на аноді та катоді дуги гнотового електрода в 5,3 і 16,0 разів менше, ніж у дузі монолітного електрода відповідно.

Дуга гнотового електрода завжди тримається на гноті й займає практично весь перетин електрода як результат взаємної дифузії компонентів у системі «гніт–електрод». Вона не мігрує по торцю електрода й, тим більше, не виходить на його бічну поверхню, забезпечуючи стабільне неконцентроване нагрівання розплаву [15].

Наведені дані обумовлюють принципово нові можливості дуги гнотового електрода, які в результаті забезпечують суттєве поліпшення практично всіх техніко-економічних показників роботи дугової сталеплавильної печі.

У роботах [12, 13] велика увага приділена оцінці впливу складів гнотів на витрату (вигар) електродів. Плавки проводили на штатному електричному режимі. Оцінку виконували по кількості плавки до повної витрати гнотових електродів у порівнянні з монолітними. Контроль витрати

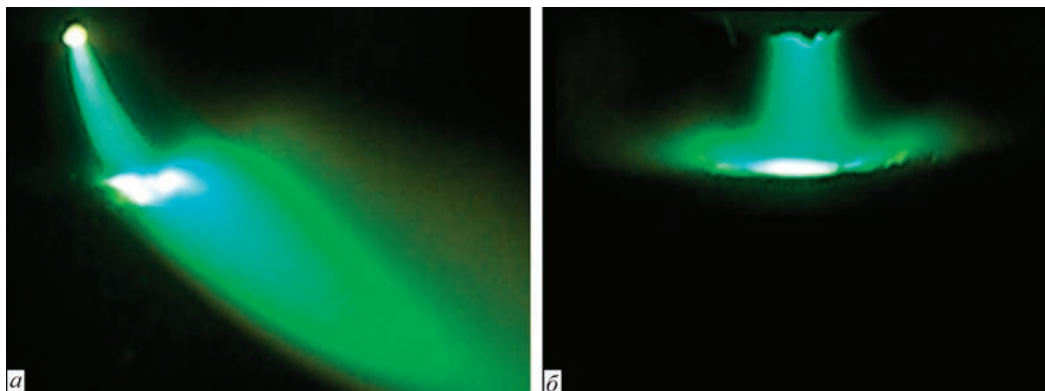


Рис. 1. Загальний вигляд дуги монолітного (а) і гнотового (б) електродів при рівних довжинах дуг ($L_d = 15$ мм): а — $U_d = 62$ В; $I_d = 720$ А; $d_k = 2,5$ мм; $d_a = 6$ мм; б — $U_d = 32$ В; $I_d = 720$ А; $d_k = 9,5$ мм; $d_a = 17$ мм; d_k — діаметр катода; d_a — діаметр анода. Анод — графіт

*У статті не приводяться склади гнотів.

Таблиця 1. Порівняння питомих показників на ділянках дуг монолітного і гнотового електродів при напрузі дуг 220 В та струмі 11000 А

Ділянка	Монолітний електрод	Співвідношення між показниками по п. 2 і 4	Гнотовий електрод
1	2	3	4
Дуга	$V_d = 1/3\pi h(r^2 + rR + R^2) = 458 \text{ см}^3$ $\sum S_1 = 235,6\text{с} + 19,6\text{к} + 75\text{а} = 333,6 \text{ см}^2$ $P_1 = 2420/458 = 5,28 \text{ кВт/см}^3$ $P_2 = 2420/333,6 = 7,25 \text{ кВт/см}^2$	4283:458 = 9,35 1404:333,6 = 4,2 5,28:0,565 = 9,35 7,25:1,724 = 4,2	$V_d = 4283 \text{ (3629 відкр. + 654 см}^3 \text{ закр.) см}^3$ $\sum S_1 = 675\text{с} + 314\text{к} + 415\text{а} = 1404 \text{ см}^2$ $P_1 = 2420/4283 = 0,565 \text{ кВт/см}^3$ $P_2 = 2420/1404 = 1,724 \text{ кВт/см}^2$
Катод	$S_k = 19,6 \text{ см}^2$ $P_3 = 45 \% P_d = 1089:19,6 = 55,56^* \text{ Вт/см}^{2**}$ $J_k = 11000 \text{ А}:19,6 = 561,2 \text{ А/см}^2$	314:19,6 = 16,0 55,56:1,48 = 37,5 561,2:35 = 16	$S_3 = 2\pi rh = 314 \text{ см}^2$ $P_3 = 19,2 \% P_d = 464,6:314 = 1,48 \text{ кВт/см}^{2*}$ $J_k = 11000:314 \text{ см}^2 = 35 \text{ А/см}^2$
Анод	$S_a = 78,5 \text{ см}^2$ $P_4 = 26 \% P_d/78,5 = 8 \text{ кВт/см}^2$ $J_a = 11000/78,5 = 140 \text{ А/см}^2$	415:78,5 = 5,3 8:1,75 = 4,6 140:26,5 = 5,3	$S_a = 415 \text{ см}^2$ $P_4 = 30 \% P_d/415 = 1,75 \text{ кВт/см}^2$ $J_a = 11000/415 = 26,5 \text{ А/см}^2$
Стовп дуги	$S_2 = 235,5 \text{ см}^2$ $P_c = (100 \% - 45 \% - 26 \%) P_d = 701,8 \text{ кВт}$ $P_5 = 29 \% P_d: 458 \text{ см}^3 = 1,53 \text{ кВт/см}^3$ $P_6 = 29 \% P_d: 235,5 = 2,98 \text{ кВт/см}^2$ $b_m = 701,8:100 = 7,02 \text{ кВт/мм}$	675:235,5 = 2,87 1229,36:701,8 = 1,75 1,53:0,34 = 4,5 2,98:1,8 = 1,66 $b_m \approx b_r$	$S_4 = 675 \text{ см}^2$ $P_c = (100 - 19,2 - 30) P_d = 1229,36 \text{ кВт}$ $P_7 = 50,8 \% P_d: 3629 \text{ см}^3 = 0,34 \text{ кВт/см}^3$ $P_8 = 50,8 \% P_d: 675 = 1,8 \text{ кВт/см}^2$ $b_r = 1229,36:150 = 8,16 \text{ кВт/мм}$

Примітки. *Прийняті усереднені дані.
**Використані лабораторні дані замірів напруги на ділянках дуг монолітного і гнотового електродів при $U_{\text{дм}} = U_{\text{др}}$.
 V_d — об’єм дуги, см^3 ; $\sum S_1$ — сумарна площа поверхні дуги, см^2 ; P_1 — питома потужність дуги, віднесена до обсягу дуги, кВт/см^3 ; P_2 — питома потужність дуги, віднесена до площі поверхні дуги, кВт/см^2 ; S_k та S_a — площі катода і анода відповідно, см^2 ; P_3 — питома потужність катода, Вт/см^2 ; P_4 — питома потужність анода, Вт/см^2 ; J_k — поверхнева щільність струму катоду, А/см^2 ; J_a — поверхнева щільність струму анода, А/см^2 ; S_2 — площа бічної поверхні стовпа дуги, см^2 ; P_c — потужність стовпа дуги, кВт ; P_5 — питома потужність стовпа дуги, віднесена до обсягу дуги, кВт/см^3 ; P_6 — питома потужність стовпа дуги, віднесена до площі поверхні дуги, кВт/см^2 ; b — градієнт напруги, В/мм ; S_3 — площа півсфери катода, см^2 ; S_4 — площа бічної відкритої поверхні стовпа дуги, см^2 ; P_7 — питома потужність стовпа відкритої дуги, віднесена до обсягу дуги, Вт/см^3 ; P_8 — питома потужність стовпа відкритої дуги, віднесена до площі поверхні дуги, кВт/см^2 .

проводили шляхом зважування електродної свічі й виміру довжини працюючого електрода після кожної плавки. Найбільшу кількість плавок забезпечив електрод із гнотом складу F_{16} (26 плавок), далі F_{20} (21 плавка), F_{21} (22 плавки) і F_{18} (22 плавки). Найменший показник мав електрод складу F_{19}

(18 плавок). У той же час енергетичні показники (час виходу електродів на стабільне горіння дуг, $\cos \phi$, коефіцієнти гармонік струму) були краще на гнотах F_{18} , F_{19} , F_{20} у порівнянні з F_{16} [13]. При цьому монолітні електроди забезпечили тільки 14 і 15,5 плавок. Таким чином, стійкість гнотових електродів (зниження вигару) зросла від 14 до 46 %. Як видно, цей показник дуже залежить від складу гнотів. Гнотові електроди забезпечили також економію активної електроенергії на 6...16 %, збільшення продуктивності печі на 12...23 %.

У загальному випадку важливою перевагою дуги гнотового електрода в порівнянні з дугою монолітного є те, що при рівних напругах на дугах або рівних довжинах дуг спадання напруги в прикатодній області гнотового електрода в 2...3 рази менше, ніж у монолітного [13, 14]. Завдяки цьому створюються сприятливі термодинамічні умови для іонізації газів у стовпі дуги гнотового електрода, активно працюють елементи з низькою роботою виходу електронів, знижуються втрати тепла в дузі і температура дуги. Довжина дуги гнотового електрода за інших рівних умов приблизно в 1,5 рази перевищує довжину дуги монолітного елек-



Рис. 2. Фрагмент роботи печі ДСВ-50 з гнотовими електродами діаметром 508 мм

трода. Характерною рисою гнотового електрода є також постійна наявність на його торці півсфери, крайки якої можуть накривати значну частину дуги. Цей фактор піддається регулюванню технологія-металурга залежно від необхідності знизити радіаційне опромінення футеровки стін або знизити вигар електрода [15].

Наведені дані по печі ДС-6Н1 слугували підставою для проведення дослідницьких робіт із застосування гнотових електродів на 50-тонній дуговій печі типу ДСВ-50 (рис. 2).

Обговорення результатів, отриманих на печі ДСВ-50. Енергетика. Встановлено, що час від включення печі до стійкого горіння дуг на гнотових електродах був в межах 10 с. Коефіцієнти гармонік струму зменшилися у середньому від 10,1 у період стабілізації дуг до 2,36 наприкінці плавки (на рідкому металі), $\cos \phi$ збільшився з 0,85...0,86 на початку плавки до 0,9...0,92 на рідкому металі. Усі показники відрізнялися високою стабільністю й дуже залежали від складу гнота та від якості шихти. На одній з дослідних плавок була випробувана робота печі на довгих дугах в режимі розвантаження. Для цього була збільшена напруга

дуги з 225...230 до 240...245 В й знижений струм з 30,5...30 і 31 (по фазах) до 24,5...24 і 23 кА, а через 25 хв до 22...21 і 20 кА. Візуально довжина дуги на розвантаженні збільшилася на 30...40 мм і склала 150...160 мм. Електричні і часові параметри цієї плавки наведені в табл. 2. Режим розвантаження проведений на етапі розплавлення шихти (1 год 18 хв) і частково на рідкому металі (14 хв). Як видно з табл. 2, загальний час роботи печі на подовжених дугах склав 1 год 32 хв або 26,3 % від загального часу плавки (5 год 50 хв). Потужність на режимі розвантаження знизилася орієнтовно на 20 %. Однак плавка відрізнялася високою стабільністю й продуктивністю печі не знизилася. На цьому режимі зменшилася питома витрата електроенергії в порівнянні з монолітними електродами в серійному режимі на 15,3...16,7 %.

Результати дослідних плавок, проведених на гнотових електродах на печі ДСВ-50 й ДС-6Н1 [12] в режимі подовжених дуг, дозволяють зробити наступні висновки й рекомендації:

на дугових печах старої конструкції, де співвідношення одиниці потужності пічного трансформатора і одиниці садки печі становить орієнтовно

Таблиця 2. Показники плавки на гнотових електродах складу F_{18} , проведеної в змішаному режимі (серійному і в режимі розвантаження)

Параметри і періоди плавки	Початок плавки, III ступінь, 371 В (режим серійний)			Розплавлення шихти, колодязі, II ступінь 388 В (режим серійний)		
	1	2	3	1	2	3
Фаза	1	2	3	1	2	3
cos φ	0,88	0,85	0,89	0,92	0,91	0,9
K, %	12,6	14,2	6,3	2,8	4,5	1,2
I, кА	30,0	30,5	31,0	30,5	30,0	31,0
Час розжигу, с	6,0	10,1	8,2	—	—	—
Час плавки, с, хв, год	10 с			38 хв		
	Від включення печі до стабілізації дуг					

Закінчення табл. 2

Параметри і періоди плавки	Розплавлення, II ступінь, колодязі, 388 В (режим розвантаження)			Рідкий метал, II ступінь, 388 В (режим розвантаження)			Рідкий метал, III ступінь, 371 В (режим серійний)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Фаза	1	2	3	1	2	3	1	2	3
cos φ	0,95	0,94	0,94	0,98	0,99	0,97	0,93	0,94	0,9
K, %	0,9	3,4	1,1	0,3	0,2	0,3	1,8	0,9	4,0
I, кА	21,0	22,0	20,0	22,0	21,0	21,0	30,5	30,5	31,5
Час розжигу, с	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Час плавки, с, хв, год	1 год 18 хв			14 хв			3 год 40 хв		
	Подовжені дуги						—		

Таблиця 3. Плавки на гнотових та монолітних електродах марки ЕГ («Укрграфіт») на серійних режимах

Номер п/п	Номер плавки	Марка сталі	Питома витрата електроенергії, кВт·г/т	Час плавки, год:хв, маса плавки, кг	Продуктивність, кг/год
Плавки на гнотових електродах					
1	В 49834	30ХГСА	646	6:50, 59280	8679,5
2	В 49835	30ХГСА	667	5:55, 59940	10131,8
3	В 49838	30ХГСА	648	5:00, 60260	12052
4	В 49847	30ХГСА	663	5:35, 57310	10265
5	В 50010	30ХГСА	677	5:10, 59680	11565,9
6	В 49850	35ХГСА	681	5:55, 60240	10182,6
			середнє 663,7	—	середнє 10479,5
Плавки на монолітних електродах (вихідних для гнотових)					
7	В 49764	35ХГСА	799	7:45, 56550	7296,8
8	В 48584	30ХГСА	775	6:45, 60320	8936
9	В 48680	30ХГСА	759	9:50, 60320	6136,3
			середнє 777,7	—	середнє 7456
			ефект на гнотових електродах — 14,7 %	—	ефект на гнотових електродах — 27,1 %

0,5 на гнотових електродах, слід використовувати максимально більшу напругу дуг і струм порядку 80...85 % від штатного, застосовуваного в цей час; замінити діючий трансформатор потужністю 25 МВт на новий потужністю 50 МВт і перевести піч в режим надвисокої потужності із застосуванням гнотових електродів діаметром 508 мм.

Обидві рекомендації безумовно вимагають істотних змін у підготовці шихтових матеріалів: подрібнювання, очищення і компактування легковагового лому, застосування великовагової, компактної обрізі й т.п. Вважаємо за доцільне рекомендувати розроблювачам і конструкторам нових дугових печей змінного й постійного струму передбачити можливість використання гнотових електродів, діаметр яких на 10...15 % менший, ніж відповідних монолітних (стандартних) електродів, які застосовуються у цей час.

Порівняння питомої витрати електроенергії й продуктивності печі проводили на серійних режимах при виплавці сталі 30ХГСА. Результати цих досліджень наведено в табл. 3. Із таблиці випливає, що: гнотові електроди забезпечили зниження питомої витрати електроенергії й збільшення продуктивності печі в порівнянні з аналогічними показниками плавок на монолітних електродах-свідках, що використовуються для виготовлення гнотових електродів, на 14,7 і 27,1 % відповідно.

Перехід на подовжені дуги (режим розвантаження) збільшив економію електроенергії до 15,3...16,7 %.

Витрата електродів. Відомо, що вартість графітованих електродів може становити 10...18 %, а в деяких випадках до 30 % від вартості сталі. Виробники електродів разом з електрометалургами постійно працюють над поліпшенням якості електродів — зниженням їх питомого електроопору й забезпеченням рівномірного розподілу цього параметра в обсязі електрода, підвищенням їх щільності, структурної однорідності, механічних характеристик і т.п. Вже освоєне промислове виробництво електродів діаметром 810 мм і довжиною до 3500 мм та електроопором на рівні 5 мк·Ом·м і нижче (електроди марок ЕГСП (УНР)).

У цій роботі на печі ДСВ-50 використовували електроди марки ЕГ (РР за міжнародним стандартом) діаметром 508 мм. Як відзначалося, усього було виготовлено 4 партії електродів (по 6 шт. кожна) із гнотами чотирьох складів F_{18} , F_{22} , F_{23} і F_{27} . Це дозволило використовувати гнотові електроди в режимі «плавка на плавку» впродовж 8 діб. Характерною рисою електродів ЕГ є їхня висока структурна неоднорідність. Ця особливість закладається ще на стадії виробництва графітованих електродів. У процесі роботи структурна неоднорідність електродів обумовлює утворення тріщин, насамперед, у ніпельному з'єднанні поблизу дуги, де через значний перегрів електрода у зов-

нішніх шарах тіла електрода й ніпеля виникають значні напруги. Ця ж неоднорідність є причиною утворення тріщин (вертикальних, під кутом і навіть по поперековому перетину) у тілі електрода. Ці тріщини часто ведуть до відколів частин електрода, маса яких може становити кілька сотень кілограмів, при тому, що маса електрода діаметром 508 мм дорівнює 700 кг. Утворення тріщин і відколів обумовлює більшу нестабільність у роботі електродів і впливає на облік їх витрат. Так, якщо між зважуваннями свічі відколів не було, то гнотові електроди забезпечили питому витрату 6,09 кг/т сталі, що становило в порівнянні з монолітними електродами-свідками (9,41 кг/т) підвищення стійкості на 35,3 %. При відколі масою 300 кг цей показник зменшився до 0,7 %. Усереднені показники по витратах електродів цієї компанії плавок показали, що середня витрата монолітних електродів-свідків склала 8,64 кг/т, а гнотових електродів — 7,17 кг/т.

Таким чином, гнотові електроди забезпечили збільшення стійкості у середньому на 16,78 %.

Металургія. У табл. 1 показано, що дуга гнотового електрода має в порівнянні з дугою монолітного електрода дуже низькі питомі показники струму й потужності. Це особливо чітко видно на катодному й анодному ділянках дуг. Логічно припустити, що й температура гнотової дуги повинна бути суттєво нижчою. Абсолютні значення температури гнотових дуг не є темою даної статті, тут ми розглядаємо лише деякі відомі з літературних джерел дані для попередньої оцінки температури гнотової дуги як явища, що суттєво розширює технологічні можливості дугових печей. У роботі [16] показано, що температура в осьовій зоні потужно-

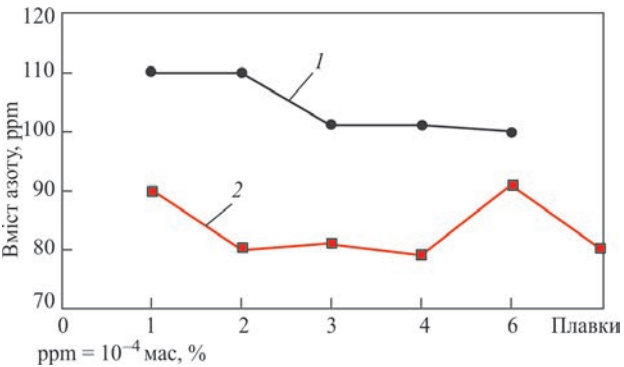


Рис. 3. Вміст азоту в сталі 30ХГСА при виплавленні: на монолітних електродах поточного виробництва (1) і гнотових електродах (2)

струмової дуги (порядку 25000 А) монолітного електрода на печі-ковші змінного струму може досягати 15000...18000 К. При цьому температура в прианодній ділянці досягає 9500 К, а прогин меніска металевий ванни досягає значної величини й може бути рівним орієнтовно половині довжини дуги. Такі дуже жорсткі умови на аноді (металі) обумовлює високий перегрів металу й шлаків. Звідси значний вигар легуючих елементів і шихти вцілому та насичення рідкого металу газами.

У роботі [17] говориться, що температура електричної дуги з порошковим оксидним катодом (дуга, що близька по своїй фізичній суті до гнотової дуги) по осі стовпа стабільно тримається на рівні 12000...13000 К. З наведених даних можна зробити досить обґрунтований висновок, що температура дуги з оксидним порошковим катодом на 15...25 % нижче, ніж у дуги монолітного графітованого електрода. І цю властивість можна використовувати з достатньою впевненістю для гнотового електрода.

Таблиця 4. Баланс легуючих елементів на дослідних плавках низьколегованих конструкційних і інструментальних сталей

Номер плавки, марка сталі	Вага плавки, т	Одиниці вимірювань	Витрата легуючих елементів			
			Cr	Ni	Mo	V
B49830, 20ХН3А	59,420	кг	—	–278	—	—
		кг/т	—	–4,7	—	—
		% від загальної кількості елемента на плавку	—	18,7	—	—
50009, 45Х9С3	62,680	кг	–717	—	—	—
		кг/т	–11,4	—	—	—
		% від загальної кількості елемента на плавку	14,07	—	—	—
B49848, 4Х5МФ1С	62,590	кг	–525	—	—	–56
		кг/т	–8,4	—	—	–0,9
		% від загальної кількості елемента на плавку	19,06	—	—	9,62
B49849, 40ХГН2М	60,110	кг	–56	–102	–14	—
		кг/т	–0,9	–1,7	–0,2	—
		% від загальної кількості елемента на плавку	11,09	9,02	8,33	—
Загалом на 4-х плавках	244,800	кг	–1298	–380	–14	–56
		середній % від загальної кількості елемента на плавку	14,74	13,86	8,33	9,62

Примітка. Знак «мінус» означає економію елемента в порівнянні із плановою витратою.

Таблиця 5. Загальний вигар шихти по плавках інструментальних і конструкційної сталей

Марка сталі	Одиниці вимірювання	Вигар, кг		
		фактичний	плановий	відхилення
45Х9С3	кг	5608	5641	−33
	кг/т	89,5	90,0	−0,53
4Х5МФ1С	кг	4469	4945	−476
	кг/т	71,4	79,0	−7,6 (9,6 %)
40ХГН2М	кг	4776	4809	−33
	кг/т	79,5	80,0	−0,5
Разом по 3-х плавках	кг	14853	15395	−542
	кг/т	80,13	83,0	−2,87 (3,5 %)

Примітка. Знак «мінус» означає економію зниження вигару елемента в порівнянні із плановою витратою.

Низька температура гнотової дуги позитивно позначилася на трьох технологічних факторах, досліджених у цій роботі — зниженні вмісту азоту в сталі, вигару легуючих елементів і шихти. Добре відомо, що чим вище температура металу, тим вище розчинність азоту в рідкій сталі [18]. Порівняння вмісту азоту в металі при застосуванні монолітних (поточне виробництво) і гнотових електродів проводилося на сталі 30ХГСА (рис. 3).

Видно, що середній вміст азоту при виплавленні сталі на монолітних електродах склав 104 ppm, а на гнотових — 83 ppm. Таким чином, гнотові електроди забезпечили вміст азоту в сталі 30ХГСА при виплавці на печі ДСВ-50 на 20 % менше. Ця обставина відкриває певну можливість виробництва на дугових печах із гнотовими електродами цілого ряду рейкових сталей, у яких регламентований вміст азоту на рівні 90 і 100 ppm (Європейський стандарт EN 13674-1:2003+A1:2007) [19].

Оцінка впливу гнотових електродів на економію легуючих на печі ДСВ-50 проводилася при виплавці низьколегованих конструкційних і інструментальних сталей (табл. 4). З таблиці випливає, що гнотові електроди забезпечили економію легуючих (залежно від марки сталі) від 8,33 до 14,74 %.

Оцінка впливу гнотових електродів на загальний вигар шихти проводилася на інструментальних і конструкційних сталях 45Х9С3, 4Х5МФ1С і 40ХГН2М (табл. 5).

З наведених даних випливає, що при виплавці зазначених сталей із застосуванням гнотових електродів має місце зниження вигару шихти на 3,5...9,6 %.

Економіка. Розрахунки економічного ефекту, проведені за результатами цієї роботи, виконані з

урахуванням цін на матеріали, енергоносії і їх питомі витрати станом на липень 2022 р. Розрахунки показали, що загальна економія при виплавці вказаних сталей на печі ДСВ-50 із застосуванням гнотових електродів складає 400...500 грн/т сталі. При цьому витрати матеріалів і оплата праці по виготовленню гнотових електродів становить 1,5...2,0 % від загального економічного ефекту.

Висновки

1. На печі ДСВ-50 проведена серія експериментальних плавок із застосуванням графітованих гнотових електродів чотирьох складів (F_{18} , F_{22} , F_{23} і F_{27}). Плавки проводили безупинно у режимі плавка на плавку.

2. Ця робота дозволяє зробити дуже важливий висновок, що масштабний фактор (перехід з 6-тонної печі трифазного змінного струму типу ДС6-Н1 на 50-тонну піч типу ДСВ-50) не знижує технічну й економічну ефективність застосування гнотових електродів на дугових сталеплавильних печах. Це дає підставу стверджувати, що застосування гнотових графітованих електродів не обмежується ємністю діючих дугових сталеплавильних печей змінного струму аж до 210 т.

3. Гнотові електроди забезпечили наступні показники: зниження питомої витрати графітованих електродів на 16,1...31,4 %; економію активної електроенергії у середньому на 16,5 %; збільшення продуктивності печі на 18...27 %; зниження вмісту азоту в сталі у середньому на 20 %; зниження вигару легуючих елементів (Cr, Ni, V, Mo) на 8,0...14,5 %; зниження загального вигару шихти на 3,5...9,6 %.

4. Ефективність застосування гнотових графітованих електродів підвищується при роботі на довгих дугах. Питома витрата електроенергії знизилася на 15,3...16,7 % у порівнянні з роботою гнотових електродів на коротких дугах (штатний режим).

Список літератури/References

1. Yanrui, Wu (2000) The Chinese steel industry: Recent developments and prospects. *Resources Policy*, 26(3), 171–178. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-4207\(00\)00026-X](https://doi.org/10.1016/S0301-4207(00)00026-X)

2. Guan, X. (2018) Toward resources and processes sustainability. Pt I. *JOM*, 70, 113–114. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2702-2>

3. Billings, S.A., Boland, F.M., Nicholson, H. (1979) Electric arc furnace modelling and control. *Automatica*, 15(2), 137–148. DOI: [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(79\)90065-7](https://doi.org/10.1016/0005-1098(79)90065-7)

4. Guo, Z.C., Fu, Z.X. (2010) Current situation of energy consumption and measures taken for energy saving in the iron and steel industry in China. *Energy*, 35(11), 4356–4360. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.008>

5. Baumert, J.-C., Thibaut, J.-C., Weiler, C. et al. (2006) Continuous monitoring of graphite electrode wear at the electric arc

- furnace. *Rev. Met. Paris*, 103(6), 266–274. DOI: <https://doi.org/10.1051/metal:2006104>
6. Daneshmand, S., Vini, M.H. (2023) Investigation of TiO_2/SiC coating on graphite electrodes for electrical arc furnaces. *J. Mater. Eng. and Performance*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08230-8>
 7. Yachikov, I.M., Portnova, I.V., Bystrov, M.V. (2019) Efficiency of application of evaporative cooling of graphite electrodes to reduce their consumption in arc furnaces. *Mat. Sci. Forum*, **946**, 444–449. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.946.444>
 8. Rafiei, R., Kermanpur, A., Ashrafzadeh, F. (2008) Numerical thermal simulation of graphite electrode in EAF during normal operation. *Ironmaking & Steelmaking*, 35(6), 465–472. DOI: <https://doi.org/10.1179/174328108X318392>
 9. Jones, R.T., Reynolds, Q.G., Curr, T.R., Sager, D. (2011) Some myths about DC arc furnaces. *J. of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 111(10), 665–674. http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532011001000004&lng=en&tlng=en
 10. Pauna, H., Willms, T., Aula, M. et al. (2020) Electric arc length-voltage and conductivity characteristics in a pilot-scale ac electric arc furnace. *Metall. Mater. Transact. B*, **51**, 1646–1655. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01859-z>
 11. Bogachenko, A.G., Mishchenko, D.D., Goncharov, I.O. et al. (2023) Efficiency of using cored graphitized electrodes on electric arc furnaces of direct current. *Advances in Materials Sci.*, 23(1), 82–97. DOI: <https://doi.org/10.2478/adms-2023-0006>
 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 Elektrometall.*, **1**, 48–53 [in Ukrainian]. 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>
 14. Bogachenko, O.G., Mishchenko, D.D., Honcharov, I.O. et al. (2023) Application of graphitized wick electrodes in DC arc steel furnaces. *Suchasna Elektrometall.*, **1**, 53–61 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2023.01.07>
 15. Paton, B.E., Lakomsky, V.I., Galinich, V.I. et al. (2011) Cored electrodes of electric arc furnaces. *Chyornye Metally*, **5**, 13–15 [in Russian].
 16. Krikent, N.V., Krivtsun, I.V., Demchenko, V.F. et al. (2018) *Numerical modeling of high-current arc discharge in DC ladle-furnace installation*. In: Physical processes in welding and processing of materials: Coll. of Articles and Papers. Kyiv, 135–140 [in Russian].
 17. Lakomsky, V.I. (1997) *Oxide cathodes of electric arc*. PWI, Zaporozhie, Research Center of Plasma Technologies, Society Intern [in Russian].
 18. Lakomsky, V.I., Lakomsky, V.V. (2012) *Nitrogen in liquid steels and slags*. Ed. by B.E. Paton. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
 19. Medovar, L.B., Stovpchenko, G.P., Polishko, G.O. et al. (2018) Modern rail steels and solutions ESR (Review). Information 1: Operating conditions and defects observed. *Sovrem. Elektrometall.*, **1**, 3–8 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2018.01.01>

APPLICATION OF GRAPHITIZED CORED ELECTRODES IN 50 TON STEEL MELTING AC ARC FURNACE OF DSV-50 TYPE

O.G. Bogachenko¹, A.V. Chernyakov¹, I.O. Goncharov¹,
S.G. Kiiiko², I.M. Logozynskyi², B.A. Levin², A.G. Fedkov², K.M. Gorban²
¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

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

²PJSC «Dniprospeetsstal». 81 Pivdenne Highway Str., 69000, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: info@dss.com.ua

Experimental melts were conducted in 50 ton three-phase AC furnace of DSV-50 type, using graphitized cored electrodes. Low-alloy, high-strength alloy and tool steels of twelve grades were produced. Cores of four compositions were tested (F_{18} , F_{22} , F_{23} and F_{27}). Melts were conducted in a continuous «melt on melt» mode. It is shown that application of cored electrodes ensured: lowering of specific consumption of graphitized electrodes by 16.1...31.4 %; active power savings by 16.5 %, on average; increase of furnace productivity by 18...27 %; lowering of nitrogen content in steel by 20 %, on average; lowering of alloying element loss (Cr, Ni, V, Mo, etc.) by 8.3...14.7 %; lowering of total loss of charge by 3.5...9.6 %. It is shown that compared to technical-economic characteristics, obtained for DS-6N1 furnace, increase of furnace capacity from 6 to 50 tons did not lower the effectiveness of cored electrode application in AC arc furnaces, i.e. cored graphitized electrodes can be successfully used in arc furnaces of unlimited capacity. 19 Ref., 5 Tabl., 3 Fig.

Keywords: cored electrodes, arc furnaces, electric arc, elongated arcs, power saving

Отримано 11.07.2023

Отримано у переглянутому вигляді 10.10.2023

Прийнято 05.02.2024

