



УКРАЇНА

(19) UA (11) 87794 (13) C2

(51) МПК (2009)

C22B 4/00

C21B 13/12 (2009.01)

C21B 11/10 (2009.01)

H05B 7/148 (2009.01)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

## (54) СПОСІБ ПЛАВКИ В РУДОВІДНОВЛЮВАЛЬНІЙ ЕЛЕКТРОПЕЧІ

1

(21) а200811869

(22) 06.10.2008

(24) 10.08.2009

(46) 10.08.2009, Бюл.№ 15, 2009 р.

(72) КУЦІН ВОЛОДИМИР СЕМЕНОВИЧ, ГАСИК  
МИХАЙЛО ІВАНОВИЧ, ГЛАДКИХ ВОЛОДИМИР  
АНДРІЙОВИЧ, КУЗЬМЕНКО СЕРГІЙ МИКОЛАЙО-  
ВИЧ, ЛАПІН ЄВГЕН ВОЛОДИМИРОВИЧ, ОЛЬ-  
ШАНСЬКИЙ ВОЛОДИМИР ІЛЛІЧ, ГАНОЦЬКИЙ  
ВОЛОДИМИР ГРИГОРОВИЧ, ЖУРБЕНКО ВОЛО-  
ДИМИР ІВАНОВИЧ, ОВЧАРУК АНАТОЛІЙ МИКО-  
ЛАЙОВИЧ, ГАЛЛЯМОВ СЕРГІЙ БОРИСОВИЧ,  
ЛИСЕНКО ВІКТОР ФЕДОРОВИЧ(73) НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ  
УКРАЇНИ

(56) UA 6554 U, 16.05.2005

UA 71987 C2, 17.01.2005

SU 993491 A1, 30.01.1983

SU 1520128 A1, 07.11.1989

US 6614832 A, 02.09.2003

US 5568506 A, 22.10.1996

US 5708677 A, 13.01.1998

JP 02061987 A, 01.03.1990

(57) Спосіб плавки в рудовідновлювальній елект-  
ропечі, який включає вимірювання миттєвих зна-

2

чень струму, напруги електрода і знаходження електричного параметра, пропорційного відстані від торця електрода до дна вуглецевої вогнетривкої футерівки ванни печі, у момент проходження миттєвого значення струму через нуль, який **відрізняється** тим, що напругу вимірюють за допомогою струмознімної щітки безпосередньо з металевого кожуха електрода, вимірюють індуктивність електрода і знайдену величину використовують як електричний параметр, пропорційний довжині робочого кінця електрода ( $H_e$ , мм):

$$H_e = k_1 L_e^2 + k_2 L_e + k_3,$$

де  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  - коефіцієнти, визначені експериментальним шляхом;

$L_e$  - індуктивність електрода, мкГн,

а відстань від торця електрода до дна вуглецевої вогнетривкої футерівки ванни печі ( $H_{ед}$ ) визначають за виразом:

$$H_{ед} = H_B + H_T - H_e,$$

де  $H_B$  - відстань від дна вуглецевої вогнетривкої футерівки ванни печі до нижнього граничного положення електродотримача, мм;

$H_T$  - величина вертикального підйому (ходу) електрода щодо нижнього граничного положення електродотримача, мм.

Спосіб відноситься до чорної металургії, а саме до електрометалургії і може бути використаний в рудовідновлюваних електропечах для виплавки феросплавів, карбідів, фосфору і плавлених вогнетривів.

У рудовідновлюваних електропечах із зануреною дугою електроди знаходяться глибоко в шихті і відомими методами визначення відстані від торця електрода до дна вуглецевої вогнетривкої футерівки ванни печі здійснюється з великим наближенням. В той же час вищеназвана відстань відіграє велику роль для досягнення максимальної продуктивності і високих техніко-економічних показників роботи рудовідновлюваної електропечі. При

виробництві феросилікомарганцю мала відстань від торця електрода до дна вуглецевої вогнетривкої футерівки ванни печі приводить до падіння активного опору під електродом, в результаті відбувається зниження активної потужності при тому ж струмі електрода, інтенсивність процесів плавки зменшується, це приводить до втрати продуктивності печі і різкого збільшення питомої витрати електроенергії. У піч неможливо подати потрібну кількість відновника, це приводить до збільшення вмісту Mn у відвальному шлаку, зменшенню витягнення Mn і Si в сплав. При великій відстані - реакційна зона переміщується в верхні горизонти ванни печі, відмічаються втрати марганцю і кремнію у

(13) C2

(11) 87794

(19) UA

вигляді випаровування, недостатньо прогрівається розплав в районі льотки, непрогрітий метал і шлак погано розділяються в ковші під час випуску, що приводить до втрати кінцевого металу зі шлаком, погіршенню показників роботи печі, підвищенню температури під склепінням ванни, що порушує умови експлуатації обладнання печі, піч працює з аварійними простоями на ремонт.

Головна мета керування технологічним процесом у рудовідновлюваних електропечах - стабілізація відстані від торця електрода до дна вуглецевої вогнетривкої футеровки ванни печі до нижнього граничного положення електродотримача ( $H_b$ ).

Проблема полягає в знаходженні ефективного способу визначення і контролю в реальному масштабі часу відстані від торця електрода до дна вуглецевої вогнетривкої футеровки ванни електропечі кожного електрода.

Відомий аналог [«Компьютерные программы по рас чету параметров выплавки ферросплавов непрерывным углеродотермическим процессом» // Кулинич В.И., Светов Б.А., Головачев Н.П., Платонов В.Ю., Привалов О.Е. / Сталь, №1, 2002. - С.40-43], в якому запропоновані комп'ютерні програми з розрахунків впливу електричних параметрів вуглецево термічного процесу на роботу електропечі і показники виплавки феросплавів.

Найбільш близький аналог, це відомий спосіб плавки феросплавів в якому вимірюють миттєве значення струму електрода і як електричний параметр, пропорційний відстані, вибирають миттєве значення е.р.с. самоіндукції між нерухомим башмаком і ванною у момент проходження миттєвого значення струму через нуль. При рівній величині струму і напруги, які автоматично або у ручному режимі підтримуються при роботі печі, проміжок між торцем електрода і металевим розплавом рахують пропорційним індуктивному опору шихти в цьому проміжку, оскільки він значно перевищує активний опір цієї ділянки. Тому величину проміжку між торцем електрода і поверхнею металу ванни визначають по е.р.с. самоіндукції між нерухомим башмаком короткої мережі і струмопровідною подиною під час переходу миттєвого значення струму електрода через нуль, потім на печі, що діє, заміряють дійсну величину проміжку, відповідну тій е.р.с. тарують шкалу реєструючого приладу і по ній в процесі роботи печі визначають шукану величину [Авторське свідоцтво СРСР №853831, кл. H05B7/148, 1981].

Недоліками відомого способу є: недостатня точність вимірювання оскільки індуктивний опір частини вимірювального ланцюга: нерухомий башмак, гнучкий зв'язок, рухомий башмак, контактні щоби і електрод поміщений в робочий простір печі значно перевищує індуктивний опір ділянки шлак, металевий розплав, струмопровідна подина, та умова підтримки рівного струму і напруги що знижує продуктивність печі.

Мета запропонованого способу - підвищення продуктивності електропечі і зниження питомої витрати електроенергії досягається за рахунок стабілізації в реальному масштабі часу відстані від торця електрода до дна вуглецевої вогнетривкої футеровки ванни електропечі кожного електрода.

Перелік фігур:

Фіг.1 - наведена будова печі при виробництві феросплавів і позначені розмірні параметри;

Фіг.2 представлена типова електрична еквівалентна схема заміщення ділянки електрод - струмопровідна вуглецева вогнетривка футеровка ванни для одного електрода рудовідновлюваної електропечі що складається: з індуктивності  $L_e$  нелінійного опору дуги  $r_d(t)$ , активного опору, що шунтує дугу  $R_{ш}$ , та активного опору розплаву  $R_p$ . Причому, напруга  $u_e(t)$  за допомогою струмоз'ємної щітки знімається безпосередньо з металевого кожуха електрода, виключаючи з вимірювального ланцюга нерухомий башмак, гнучкий зв'язок, рухомий башмак, контактні щоби.

Фіг.3 - наведена залежність змінення миттєвих значень падіння напруги ( $U_e(t)$ ) та струму електрода ( $i_e(t)$ ) в період часу ( $t$ ). Залежності підчиняються принципу синусоїдальності відповідна до нульового значення.

Фіг.4 - наведена залежність довжини електрода від його індуктивності і показано, що вона відповідає методу пропорційності, тобто більший величині не відповідає більше значення  $L_e$ .

1. Для знаходження  $L_e$  вимірюють миттєві значення струму електрода і падіння напруги на ділянці «електрод струмопровідна вуглецева вогнетривка футеровка ванни», визначають їх спектральні складові (Фіг.3) та знаходять значення  $L_e$  використовуючи властивість електричного ланцюга змінного струму у момент часу ( $t_0$ ), коли струм електрода рівний нулю ( $i_e(t_0)=0$ ), падіння напруги на активних опорах рівне нулю:

$$u_R(t_0)=u_P(t_0)+u_D(t_0)=0,$$

при цьому  $u_e(t_0)$  дорівнює е.р.с. самоіндукції:

$$u_e(t_0)=u_L(t_0)=L_e(i_e(t_0))',$$

де,  $(i_e(t_0))'$  - похідна функції струму електрода; отже, у момент часу ( $t_0$ ) індуктивність знаходимо по формулі:

$$L_e=u_e(t_0)/(i_e(t_0))'.$$

2. Провівши серію вимірів фактичної довжини електрода з фіксацією індуктивності і величини вертикального підйому (ходу) електрода щодо нижнього граничного положення електродотримача знаходять коефіцієнти рівняння залежності між довжиною та індуктивністю електрода:

$$H_e=k_1L_e^2+k_2L_e+k_3.$$

3. Відстань від торця електрода до дна вуглецевої вогнетривкої футеровки ванни печі визначається за виразом:

$$H_{ед}=H_b+H_r-H_e.$$

де,  $H_b$  - відстань від дна вуглецевої вогнетривкої футеровки ванни печі до нижнього граничного положення електродотримача (Фіг.1),  $H_r$  - величина вертикального підйому (ходу) електрода щодо нижнього граничного положення електродотримача, мм.

Приклад конкретного випробування

Дослідження вищевказаного способу проводилися на феросплавній електропечі при виплавці феросилікомарганцю з використанням індустріального комп'ютера з вмонтованим швидкодіючим АЦП типу L-783. Через пристрій зв'язку з об'єктом (дільники напруги), сигнали, а саме: струми електродів, вимірювані в ланцюзі вольтододаткового

трансформатора, падіння напруги на ділянці «електрод – струмопровідна вуглецева вогнетривка футерівка ванни» та величини вертикального підйому (ходу) електрода щодо нижнього граничного положення електродотримача подавали на вхід АЦП. Вихідною інформацією був масив даних, що складався з миттєвих значень вхідних сигналів, записаних з частотою 200 значень за період. Після формування масиву, піч зупинялась і робилися

контрольні виміри фактичної довжини усіх 6 електродів. Подальший розрахунок здійснювався у табличному редакторі «Excel». Було проведено 3 вимірювання з інтервалом проведення планово-попереджувальних ремонтів (1 місяць) при різній довжині електродів. Результати вимірювань та розрахунків наведено в табл.1. З їх аналізу випливає, що між  $L_e$  і довжиною електрода  $H_e$  існує тісний зв'язок.

Таблиця 1

Знайдена індуктивність і відповідна їй фактична довжина електродів

№ вимірювання	№ електрода	$L_e$	Фактична $H_e$
		мкГн	мм
1	1	1,56	2800
	2	1,45	2900
	3	1,50	2800
	4	1,42	2600
	5	1,40	2600
	6	1,43	2800
2	1	1,77	3300
	2	1,63	3000
	3	1,60	3100
	4	1,62	3200
	5	1,59	3000
	6	1,65	3000
3	1	1,32	2300
	2	1,32	2300
	3	1,28	2400
	4	1,29	2400
	5	1,26	2300
	6	1,42	2500

Коефіцієнти рівняння залежності довжини електрода від індуктивності ( $H_e = k_1 L_e^2 + k_2 L_e + k_3$ ), значення коефіцієнта детермінації ( $R^2$ ), та характер зв'язку наведено на (Фіг.4). Для визначення якості моделі було проведено четвертий контрольний вимір. Його результати порівнювали з  $H_e$  розрахованою за допомогою знайдених коефіцієнтів

(табл.2). Відносна похибка моделі не перевищує 1%, що є достатнім для оперативного контролю довжини електрода та стабілізації відстані від торця електрода до дна вуглецевої вогнетривкої футерівки ванни електропечі в реальному масштабі часу.

Таблиця 2

Знайдена індуктивність і фактична та розрахована довжина електрода

№ вимірювання	№ електрода	$L_e$	Фактична $H_e$	Розрахована $H_e$	Відносна похибка
		мкГн	мм	мм	
4	1	1,58	2900	2925	0,86%
	2	1,55	2850	2870	0,70%
	3	1,61	3100	3085	-0,48%
	4	1,55	2850	2835	-0,30%
	5	1,63	3000	3015	0,50%
	6	1,74	3200	3180	-0,63%

Запропонований спосіб плавки в рудно відновлюваній електропечі, що включає визначення відстані від торця електрода до дна вуглецевої вогнетривкої футерівки ванни в рудовідновлювальних електропечах і ґрунтується на визначенні індуктивності електрода і її зв'язку з його довжиною та урахуванням величини вертикального підйому

(ходу) електрода щодо нижнього граничного положення електродотримача є зручними для використання в автоматичній системі контролю та управління плавкою в рудовідновлювальній електропечі.

Таким чином, стабілізація висоти відстані від торця електрода до дна вуглецевої вогнетривкої

футеровки ванни в рудовідновлюваних електропечах забезпечує підвищення продуктивності печі та зниження питомої витрати електроенергії при ви-

робництві ферросилікомарганцю (табл.3). Точність вимірювання в дослідних плавках складала 99,2-99,6%.

Таблиця 3

Опосередковані результати промислових випробувань способу плавки ферросилікомарганцю в рудовідновлювальній електропечі

Випробування	№ п/п	$L_e$ , мкГн, (замір)	$H_e$ , мм, (замір)	$H_{ed}$ , мм, (замір)	$H_b$ , мм, (проект)	$H_t$ , мм, (замір)	$H_{ed}$ , мм, (розрахунок)	$\Pi$ , т/доб, (замір)	Підвищення $\Pi$ , %	$q$ , кВт*г/т (розрахунок)	Зменшення $q$ , %
Заявлений спосіб	1	1,63	3095	3084	3600	790	1295	308	+2,5	4065	-2,8
	2	1,50	2910	2923	3600	600	1290	307	+2,2	4078	-2,4
	3	1,40	2660	2670	3600	360	1300	305	+1,5	4105	-1,8
	4	1,31	2440	2425	3600	140	1300	304	+1,2	4118	-1,5
	5	1,66	3050	3050	3600	745	1295	309	+2,8	4052	-3,1
Базовий спосіб	6	-	-	-	3600	600	1550	300,5	0	4180	0

Результати промислових випробувань підтверджують ефективність заявленого способу виплавки в рудовідновлювальній електропечі ферросилікомарганцю в порівнянні з відомим способом. Так продуктивність електропечі підвищується на 1,2-2,8%, а витрати електроенергії зменшуються на 1,5-3,1%. Між величиною індуктивності  $L_e$  і довжиною електрода  $H_e$  відмічається прямо пропорційна залежність. При збільшенні указаних параметрів величина відстані від торця електрода до дна вуглецевої вогнетривкої футеровки ванни печі  $H_{ed}$  скорочується, при цьому електроди і реакційна зона розміщуються глибоко в шихті, процеси відновлення марганцю і кремнію та ступінь їх переходу в сплав характеризуються значно більшими відсотками, відповідно до чого підвищується продуктивність електропечі і зменшуються питомі витрати електроенергії.

Питомі витрати електроенергії, розраховані з урахуванням електричних характеристик трансформатора печі і електроплавки та фактичної продуктивності печі відповідають практичним показникам плавки ферросилікомарганцю (4050-4070кВт\*г/т), що підтверджує достовірність запропонованого способу плавки в рудовідновлювальній електропечі.

Похибка розрахунків в порівнянні з вимірюваннями довжини електрода та визначенні відстані від торця електрода до дна вуглецевої вогнетривкої футеровки ванни печі (положення реакційної зони) складає  $\pm 0,4-0,8\%$ .

Заявлений спосіб забезпечує як точність вимірювань індуктивності електрода, розрахунків дов-

жини робочого кінця електрода до дна вуглецевої вогнетривкої футеровки ванни печі так і стабілізацію положення та ширини реакційної зони у ванні рудовідновлювальної електропечі при виплавці феросплавів.

Прийняті позначення:

$u_e(t)$  - миттєве значення падіння напруги на ділянці «електрод - струмопровідна подана», В;

$i_e(t)$  - миттєве значення струму електрода, кА;

$u_R(t)$  - миттєве значення падіння напруги на активному опорі, В;

$u_L(t)$  - миттєве значення е.р.с. самоіндукції, В;

$L_e$  - індуктивність електрода, мкГн;

$r_d$  - миттєве значення нелінійного опору дуги, МОм;

$R_p$  - активний опір розплаву, МОм;

$R_{ш}$  - активний опір що шунтує дугу, МОм;

$H_e$  - довжина електрода від нижнього краю контактної щок, мм;

$k_1, k_2, k_3$  - коефіцієнти рівняння залежності довжини електрода від індуктивності;

$H_{ed}$  - відстань від торця електрода до дна вуглецевої вогнетривкої футеровки ванни печі, мм;

$H_b$  - відстань від дна вуглецевої вогнетривкої футеровки ванни печі до нижнього граничного положення електродотримача, мм;

$H_t$  - величина вертикального підйому (ходу) електрода щодо нижнього граничного положення електродотримача, мм;

$\Pi$  - продуктивність електропечі, т/добу;

$q$  - питома витрата електроенергії, кВт\*г/т.

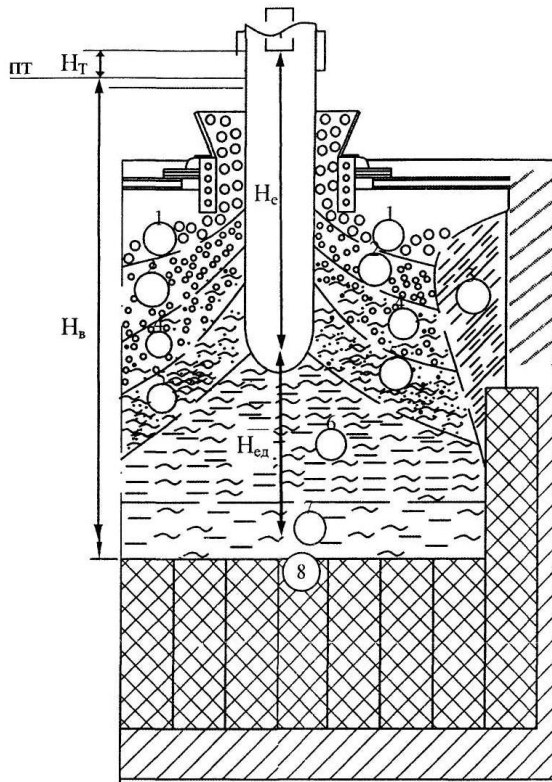


Fig. 1.

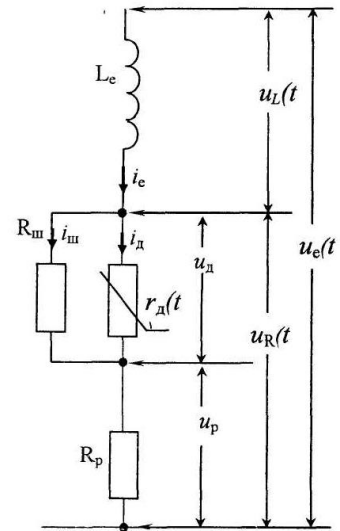


Fig. 2

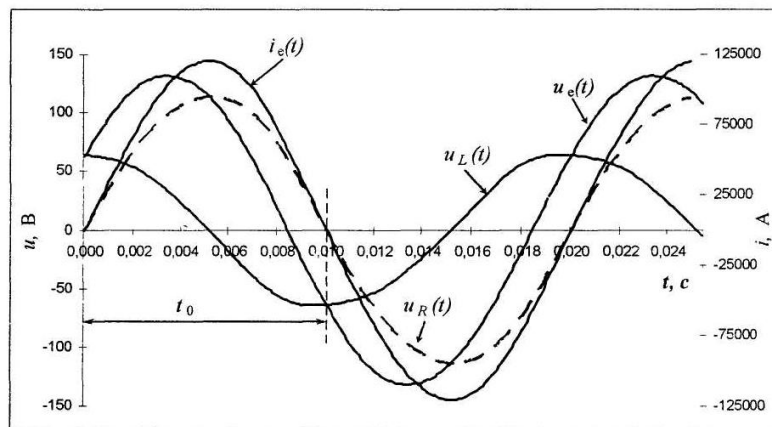
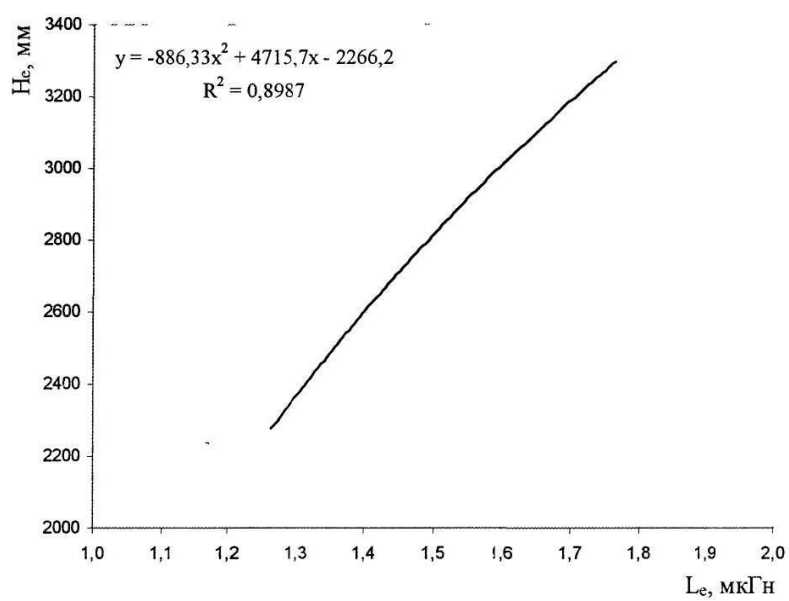


Fig. 3



Фиг. 4