

КОМПОЗИТНІ (ГНОТОВІ) ГРАФІТОВАНІ ЕЛЕКТРОДИ ДЛЯ ПРОМИСЛОВИХ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ



Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона
Національної академії наук України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

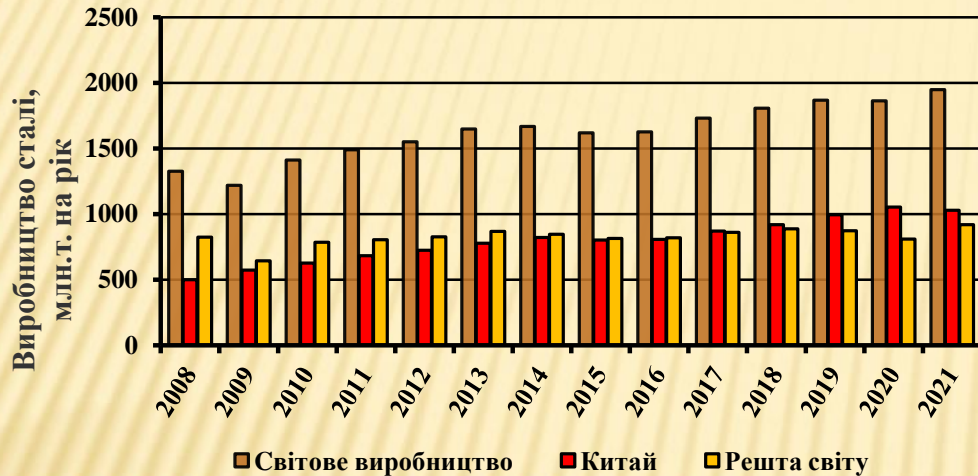
Приватне Акціонерне Товариство «Електрометалургійний
завод «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ» ім. А.М. Кузьміна»

Наукова робота на здобуття
Національної премії імені Бориса Патона
за 2024 рік висунута Вченою радою
Інституту електрозварювання ім. Є.О.Патона
Національної академії наук України



СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ ВИРОБНИЦТВА СТАЛІ І ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ, ЯКІ ПОТРЕБУЮТЬ ВИРІШЕННЯ В ГАЛУЗІ ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЇ

СВІТОВЕ ВИРОБНИЦТВО СТАЛІ (за даними World Steel Association)



Частка електросталі в світовому виробництві сталі

Частка електросталі в світовому виробництві сталі, в тому числі за країнами	30 %
Люксембург, Саудівська Аравія, Індонезія	100%
Італія	58%
США	46%
Південна Корея	41%
Германія	30%
Україна	менше 30%

ОСНОВНІ НЕДОЛІКИ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ

ОСНОВНІ НЕДОЛІКИ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ ЗМІННОГО СТРУМУ:

- високі витрати графітованих електродів при виплавленні легованих сталей, що суттєво відбивається на собівартості виробництва сталі (до 12,5%);
- великий угар легуючих елементів сталі, таких як хром, ванадій, титан в період розплавлення металевого скрапу в печі;
- робота печі на змінному струмі супроводжується значним шумом і веде до помітного забруднення навколишнього середовища пічними газами та пилом;
- великі витрати вогнетривких матеріалів на футерування стін та склепіння печі;
- значні коливання сили електричного струму, що впливає на первинну електричну мережу, створюючи в ній відчутні збурення.

ОСНОВНІ НЕДОЛІКИ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ:

- наявність одного або декількох подових електродів, експлуатація яких потребує постійного контролю та обслуговування;
 - відхилення дуги в бік, протилежний розташуванню джерела живлення і відповідний локальний перегрів футеровки;
 - необхідність використання на одноелектродних високопотужних печах графітованих електродів граничних розмірів – 700, 750 та, можливо, 810 мм, вартість яких досягає 30 % вартості сталі.
- Загальним недоліком електродугових сталеплавильних печей є міграція дуги по торцю електрода та недостатньо висока стабільність електричного режиму і високі витрати електроенергії - до 600 – 700 кВт*год на 1 тону сталі.

ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ГРАФІТОВАНИХ ЕЛЕКТРОДІВ ДЛЯ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ

- масовий перехід на дугові печі великої ємності, високої (high power) і понад високої (ultra high power (UHP)) потужності;
- збільшення струмового навантаження на електроди понад 150 кА (густини струму понад 45 А/см²) і зростання діаметра електродів (до 810 мм);
- зниження питомого електричного опору електродів менше 5 мкОм*м.

Рекомендовані струми (кА) для графітованих електродів на металургійних агрегатах змінного АС і постійного струму LF і DC

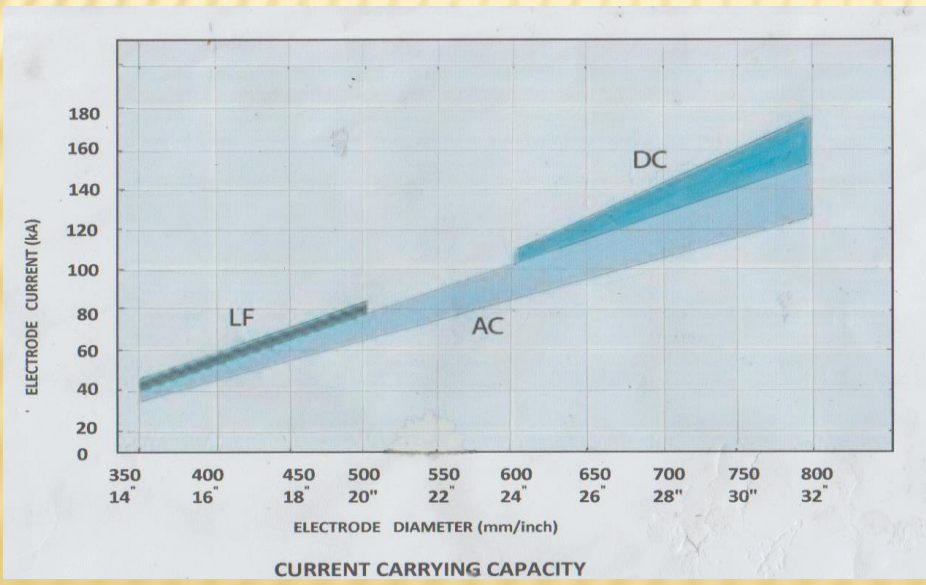
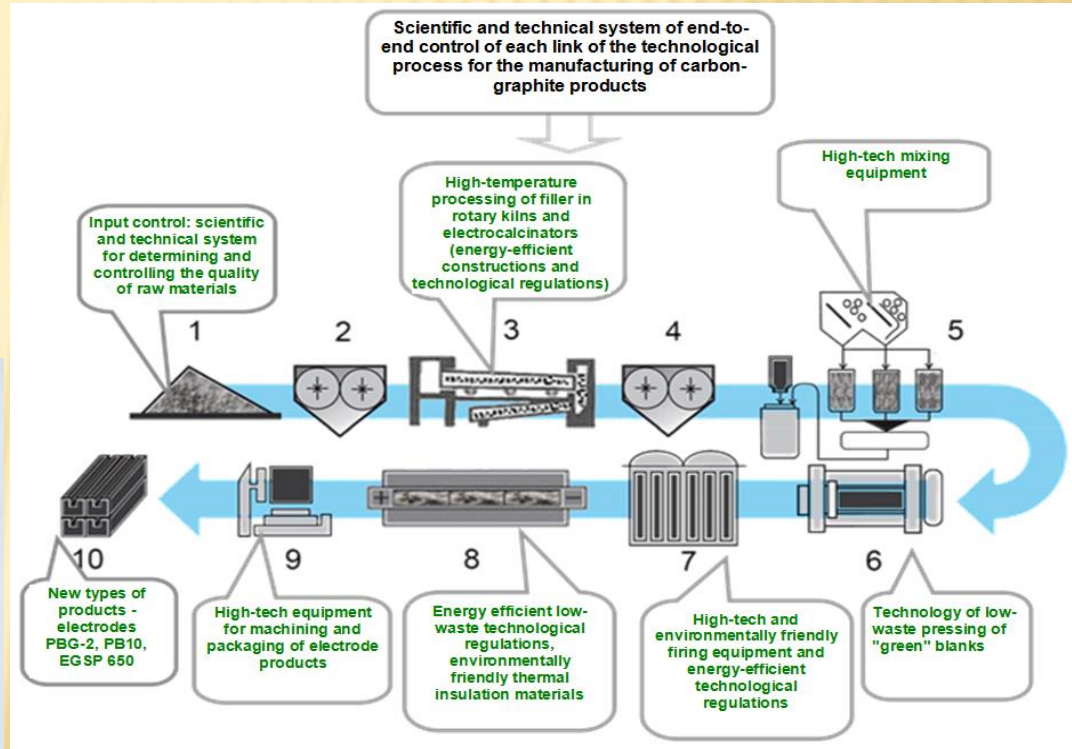


Схема промислового виробництва графітованих електродів і основні завдання із модернізації технології



- 1 - сировина; 2 - подрібнення; 3 - прожарювання;
 4 - подрібнення; 5 - підготовка вуглецевої маси;
 6 - пресування; 7 – обжиг; 8 - графітування;
 9 - механічна обробка; 10 - готова продукція.

АКТУАЛЬНІСТЬ, МЕТА РОБОТИ І МАСШТАБИ РЕАЛІЗАЦІЇ

4

Актуальність роботи. В Україні стан металургійної галузі завжди визначав стан держави. З початком війни важливість її продукції, яка широко застосовується у воєнній техніці і зброї, для виживання держави, для перемоги зросла в рази. Тому актуальність запропонованої роботи, спрямованої на зниження енерго- і ресурсовитрат, покращення умов праці в металургії і екологічного стану в промислових регіонах, не має викликати сумнівів. Її основною метою є підвищення енергетичної, економічної, екологічної безпеки України, її обороноздатності.

Мета роботи: створення графітованих ґнотових електродів з керованим впливом на електричні і теплові процеси в потужнострумових дугах промислових дугових сталеплавильних печей, які забезпечують суттєве покращення техніко-економічних показників роботи печей постійного та змінного струму.

Масштаби реалізації роботи. Графітовані ґнотові електроди пройшли перевірку в промислових умовах на 12-тонних дугових печах постійного струму (ПрАТ «Ферокс»), 6-ти та 50-ти тонних печах змінного струму (ПрАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» ім. А.М.Кузьміна»). Із застосуванням ґнотових графітованих електродів на печах ДСВ-50 виконані плавки 14-ти марок сталей: вуглецевих конструкційних, низьколегованих високоміцних, вуглецевих інструментальних, легованих інструментальних та ін. Ці сталі успішно застосовують при виготовленні шестерен, муфт, шатунів, пальців і т.п. деталей для двигунів внутрішнього згорання і їх комунікацій у складі танків, БМП, БТР, тягачів і іншої гусеничної й колісної техніки, використаної як в бойових умовах, так і в роботі інженерних підрозділів, окремих елементів двигунів, стійок шасі літаків і гвинтокрилів. Ці сталі використовують також у виготовленні стволів мінометів, окремих частин і вузлів протитанкових гранатометів, підствольних гранатометів і т.п. озброєння різних калібрів і призначення, а також у виробництві боєприпасів, зокрема корпусів снарядів калібром до 155 мм.

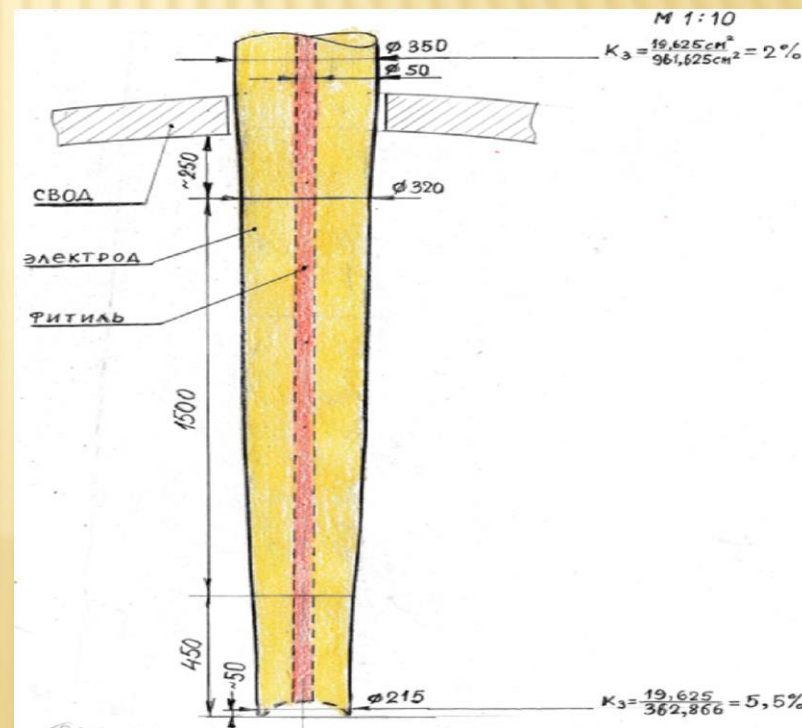


ОСНОВНА ІДЕЯ СТВОРЕННЯ ГРАФІТОВАНИХ ГНОТОВИХ ЕЛЕКТРОДІВ

Для зменшення витрат електродів на плавку треба знижувати температуру робочого кінця електрода, тобто треба знижувати температуру катодної плями дуги, водночас забезпечуючи велику силу струму. Таку мету можна досягти забезпечивши високо інтенсивний потік електронів з катодної плями. Для цього треба знизити енергетику процесів утворення потужних електронних потоків з катодної плями та створити сприятливі енергетичні умови для сталих прикатодних процесів дугового розряду.

Для цього запропоновано вводити в катодну пляму хімічні елементи I або II групи Періодичної системи Д.І Менделєєва з низькою роботою виходу електронів і розташовувати катодну пляму в центральній частині графітованого електрода.

Загальний вигляд і схема графітованого гнотового електрода діаметром 350 мм



Основні завдання при розробці графітованих гнотових електродів

Забезпечити поблизу катодної плями електричної дуги графітованого електрода сприятливі термодинамічні умови для іонізації газів стовпа дуги

Одна (або кілька) тверда композитна вставка (гніт), розташована в поздовжньому отворі графітованого електрода.



Високе струмове навантаження на гніт

Зниження катодного падіння напруги

Формування робочого торця електрода у вигляді увігнутої сфери

Поліпшення якості ел. енергії

Стабільна прив'язка дуги на катоді (гноті)

Зниження рівня шуму печі

Зниження викидів пилу та газів у 4...5 разів

Стабільна робота на довгих дугах та низьких напругах трансформатора

Підвищення стабільності горіння дуги та режиму плавки

Зниження температури катодної плями та електрода в цілому

Зниження інтенсивності окислення електрода



Зниження радіаційних втрат на перегрів стін та склепіння печі до 28-40%

Зниження кількості ремонтів печі

Збільшення продуктивності печі загалом

Зниження витрати вогнетривів

Зниження пит. витрати електроенергії

Зниження пит. витрати електродів

Економія в умовах виробників сталі

Зниження напруги на дузі загалом

Зниження необхідної сили струму в електроді на ДСП ПС

Зниження споживаної електричної потужності на плавку в цілому

Зниження теплового навантаження на подовий електрод

Збільшення струмового навантаження на ДСППТ без зміни матеріалу електрода та його діаметра

Зменшення діаметра електрода без зміни його матеріалу

Економія для умов конкретного виробника електродів

Зниження ймовірності утворення тріщин в електродах

Зниження щільності струму на електрод

Застосування для гнотових електродів недорогих вихідних матеріалів

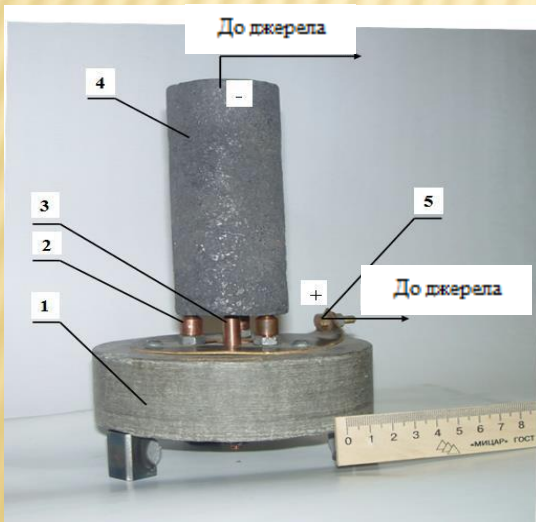
Виключення модернізації обладнання для великих електродів

Економія матеріалів, зокрема. повернення стружки від виготовлення гноту

ЛАБОРАТОРНЕ УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ГРАФІТОВАНИХ ГНОТОВИХ ЕЛЕКТРОДІВ



Устаткування для виготовлення модельних графітованих електродів Ø50 мм



Устаткування для дослідження розподілу струму по перерізу графітованого гнотового електрода
 1 - корпус;
 2 - струмозйомники, 3 шт.;
 3 - струмозйомник з гноту;
 4 - графітований гнотовий електрод;
 5 - струмопідвід.

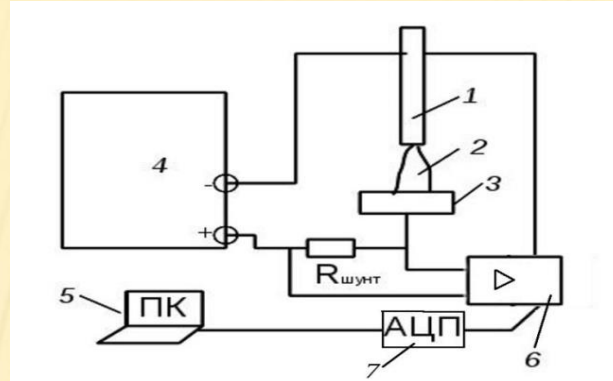


Схема вимірювання електричних параметрів електричної дуги
 1 - графітований електрод; 2 - дуговий розряд;
 3- металевий або вуглецевий анод; 4 - джерело живлення дуги, ВДУ-1001; 5 - комп'ютер; 6 - схема узгодження; 7 - аналогово-цифровий перетворювач(АЦП).

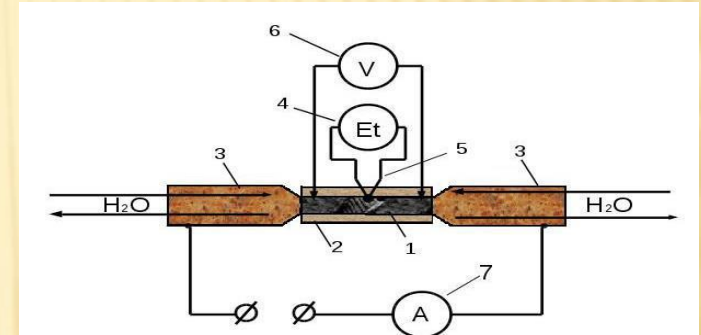


Схема вимірювання питомого електричного опору
 1 - досліджуваний матеріал; 2 - керамічна трубка;
 3 - мідний водоохолоджуваний струмопідвод;
 4 - прилад для вимірювання ЕРС термопари;
 5 - термопара ВР-5/20; 6 - вольтметр;
 7 - амперметр.

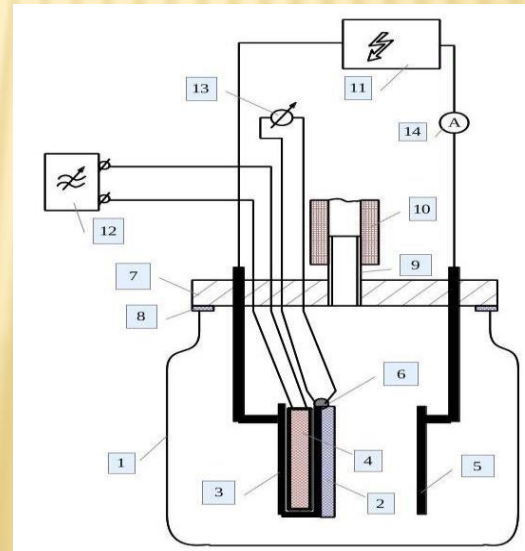


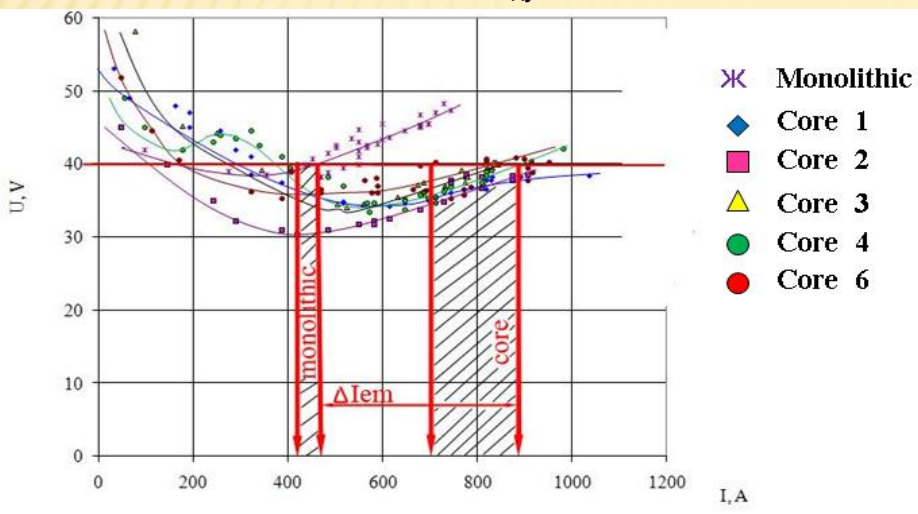
Схема дослідження емісійної здатності гнотових вставок композитних електродів

1 - скляна камера; 2 - вуглецевий катодний матеріал; 3 - сталева пластина з U- подібним профілем;
 4 - нагрівальний елемент; 5 - анодна пластина; 6 – термопара; 7 - кришка камери; 8 – прокладка; 9 – штуцер;
 10 – шланг; 11- високовольтне джерело постійного струму; 12 - джерело змінного струму для підігріву катода;
 13- потенціометр; 14- амперметр.

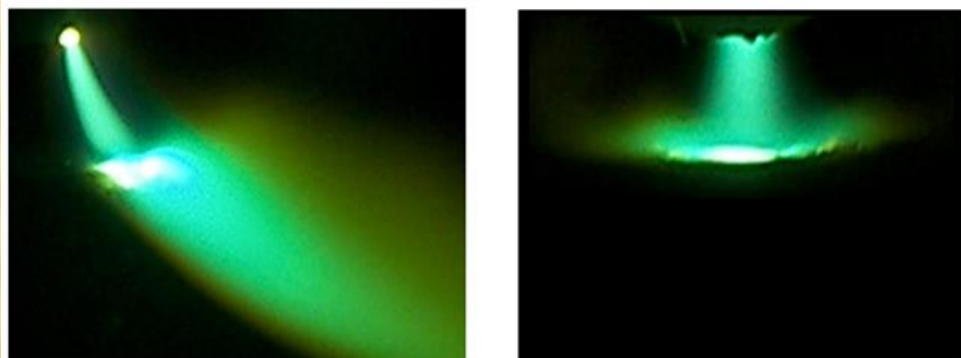
ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТУЖНОСТРУМОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДУГ

8

Вольт-амперні характеристики дуг монолітного та ґнотового електродів діаметром 50 мм при $L_{\text{дуги}} = 15$ мм.



Загальний вигляд дуги графітованих монолітного (зліва) і ґнотового (праворуч) електродів при $L_{\text{дуги}} = 15$ мм.



В ґнотовому електроді дуга розосереджена (її діаметр порівнянний з діаметром торця електроду), просторово стійка, еластична, дуже стабільна в широкому діапазоні своїх довжин і електричних режимів, має високу теплову інерційність і меншу температуру. В монолітному електроді дуга сконцентрована, катодна пляма невелика і вона постійно мігрує по поверхні торця електроду, випалюючи його і легуючі елементи із розплаву.

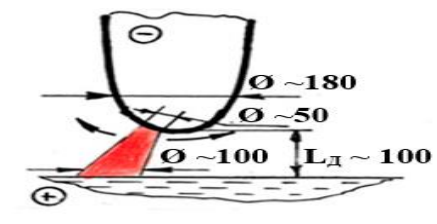
Торці дослідних графітованих ґнотових електродів після їх випробувань



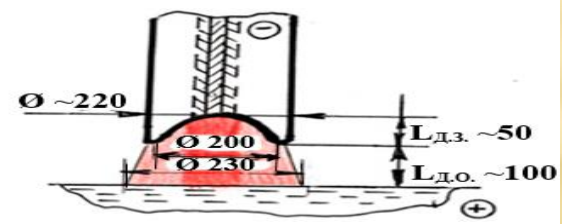
1. Катодна пляма на ґнотових електродів розміщується в центрі торця на робочому кінці електроду, тобто на ґнотовій вставці. Падіння напруги на катодній плямі ґнотового електроду завжди в 2...3 рази менше, ніж в прикатодній плямі монолітного електроду незалежно від складу ґноту, геометричних і електричних параметрів дуги. Зважаючи на різницю у розмірах катодних плям питома потужність на катоді ґнотового електроду в 37.5 разів менше, ніж у монолітного електроду, а питомий струм на катоді в 16 разів менше, відповідно.

2. При рівних напругах дуг сила струму ґнотових електродів, у середньому, в 1.8 разів перевищує силу струму монолітного електроду. Бажана величина сили струму на дузі досягається при меншій в 1,5 рази напрузі на дузі. Це відкриває можливість досягати в електродуговій печі той же ефект, що і при нагріванні металу як на монолітних графітованих електродів, але при значно меншій напрузі. Зрозуміло, що при цьому повинні знижуватися питомі витрати електроенергії і електродів, а також повинні знижуватися витрати вогнетривів на футеровку стін і склепіння печі, зменшуватиметься угар вуглецю при виплавці вуглецевих сталей.

ПИТОМІ ПОКАЗНИКИ ДУГИ МОНОЛІТНОГО І ГНОВОГО ЕЛЕКТРОДІВ ПРИ НАПРУЗІ ДУГ 220В І СТРУМІ 11000А



Вихідні умови
 $U_d = 220\text{В}; I_d = 11000\text{А}$
 $P_d = 2420\text{ кВт}$
 $\frac{L_{д.г.}}{L_{д.м.}} \approx 1,5$

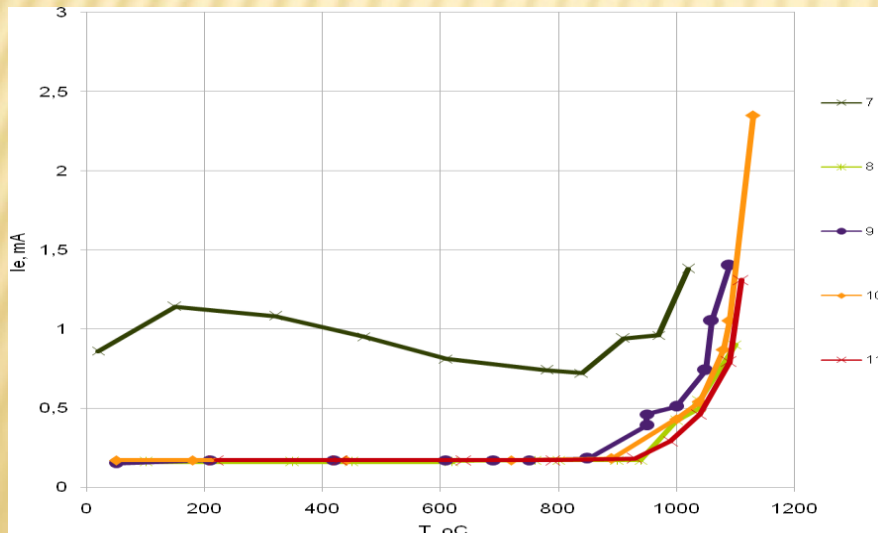
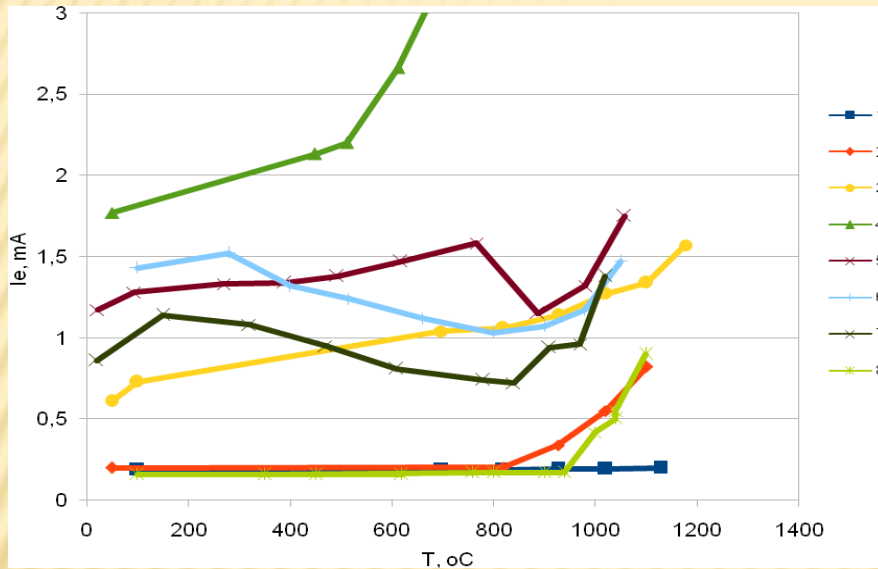


	Монолітний електрод	Співвідношення	Гнотовий електрод
ДУГА	$V_{дуги} = 1/3 \cdot \pi \cdot h \cdot (r^2 + r \cdot R + R^2) = 458\text{ см}^3$ $\sum S_{пов. дуги} = 235,6C + 19,6K + 75A = 333,6\text{ см}^2$ $R_{пит.об'єм.} = 2420 / 458 = 5,28\text{ кВт/см}^3$ $R_{пит. пов. заг.} = 2420 / 333,6 = 7,25\text{ кВт/см}^2$	$n1 = 4283 : 458 = 9,35$ $n2 = 1404 : 333,6 = 4,2$ $n3 = 5,28 : 0,565 = 9,35$ $n4 = 7,25 : 1,724 = 4,2$	$V_{дуги} = 4283 (3629\text{ відкр.} + 654\text{ см}^3\text{ закр.})\text{ см}^3$ $\sum S_{пов. дуги} = 675C + 314K + 415A = 1404\text{ см}^2$ $R_{пит.об'єм.} = 2420 / 4283 = 0,565\text{ кВт/см}^3$ $R_{пит. пов. заг.} = 2420 / 1404 = 1,724\text{ кВт/см}^2$
КАТОД	$S_K = 19,6\text{ см}^2$ $R_{пит. к.} = 45\%P_d = 1089 : 19,6 = 55,56^*\text{ Вт/см}^{2**})$ $J_K = 11000\text{А} : 19,6 = 561,2\text{ А/см}^2$	$n5 = 314 : 19,6 = 16,0$ $n6 = 55,56 : 1,48 = 37,5$ $n7 = 561,2 : 35 = 16$	$S_{к.півсф.} = 2\pi \cdot r \cdot h = 314\text{ см}^2$ $R_{пит. к.} = 19,2\%P_d = 464,6 : 314 = 1,48\text{ кВт/см}^2\text{ *)}$ $J_K = 11000 : 314\text{ см}^2 = 35\text{ А/см}^2$
АНОД	$S_A = 78,5\text{ см}^2$ $R_{пит. А} = 26\%P_d / 78,5 = 8\text{ кВт/см}^2$ $J_A = 11000 / 78,5 = 140\text{ А/см}^2$	$n8 = 415 : 78,5 = 5,3$ $n9 = 8 : 1,75 = 4,6$ $n10 = 140 : 26,5 = 5,3$	$S_A = 415\text{ см}^2$ $R_{пит.А} = 30\%P_d / 415 = 1,75\text{ кВт/см}^2$ $J_A = 11000 / 415 = 26,5\text{ А/см}^2$
СТОВП	$S_{біч.с.} = 235,5\text{ см}^2$	$n11 = 675 : 235,5 = 2,87$	$S_{біч.с.відкр.} = 675\text{ см}^2$
	$P_c = (100\% - 45\% - 26\%) P_d = 701,8\text{ кВт}$	$n12 = 1229,36 : 701,8 = 1,75$	$P_c = (100 - 19,2 - 30)P_d = 1229,36\text{ кВт}$
	$R_{пит.с.об.} = 29\%P_d : 458\text{ см}^3 = 1,53\text{ кВт/см}^3$	$n13 = 1,53 : 0,34 = 4,5$	$R_{пит.с.відкр.об.} = 50,8\%P_d : 3629\text{ см}^3 = 0,34\text{ кВт/см}^3$
	$R_{пит.с.пов.} = 29\%P_d : 235,5 = 2,98\text{ кВт/см}^2$	$n14 = 2,98 : 1,8 = 1,66$	$R_{пит.с.відкр.пов.} = 50,8\%P_d : 675 = 1,8\text{ кВт/см}^2$
	$b = 701,8 : 100 = 7,02\text{ кВт/мм}$	$b_m \approx b_g$	$b = 1229,36 : 150 = 8,16\text{ кВт/мм}$

Інтенсивність опромінювання стін печі знижується на 31 %

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕМІСІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОНЕНТІВ ГНОТІВ

Температурні залежності катодно-анодного струму електронної термоемісії в вакуумі

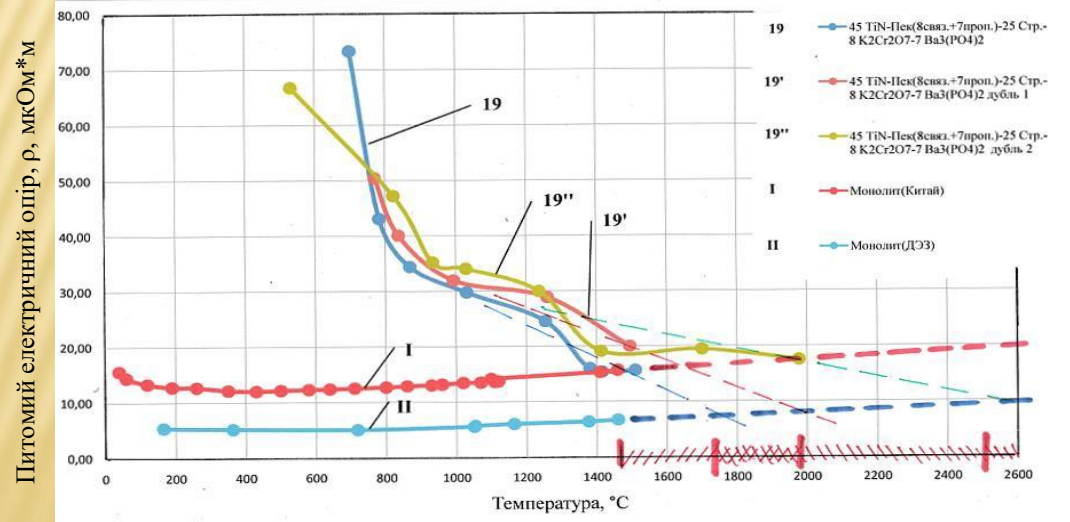
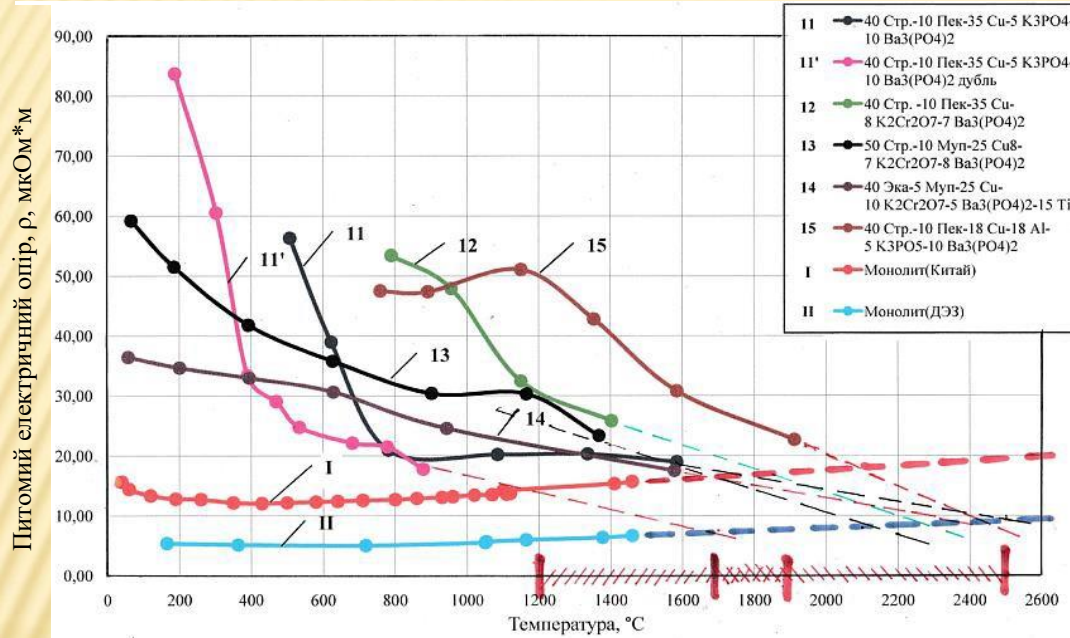


Склад гнотових матеріалів

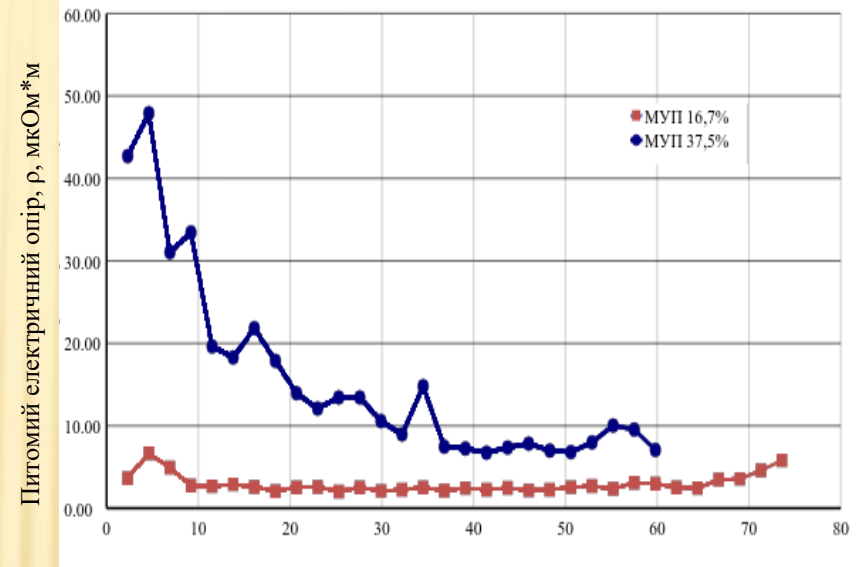
№ №	Масова частка компонентів, %						
	Графіт	МУП	$K_2Cr_2O_7$	$Ba_3(PO_4)_2$	Cu	Циркон +BaO	BaO
1	2	3	4	5	6	7	8
1	80	20	0	0	0	0	0
2	74	20	3	3	0	0	0
3	68	20	6	6	0	0	0
4	60	20	10	10	0	0	0
5	60	20	0	0	0	20	0
6	45	20	10	10	15	0	0
7	61	20	7	7	0	5	0
8	50	20	10	10	0	10	0
9	69,4	20	6	0	0	0	4,6
10	62,4	20	10	0	0	0	7,6
11	67,6	20	7	0	0	0	5,4

1. Збільшення вмісту в гноті сполук елементів I і II групи Таблиці Менделєєва з низькою роботою виходу електронів в 1,6-8,0 разів підвищує силу катодного струму. Проте, збільшення їх вмісту більше 6 - 10 % не призводить до пропорційного збільшення емісійної здатності.
2. Введення добавок, що підвищують електропровідність, не впливає негативно на емісійну здатність катода.
3. Заміна фосфорнокислого барію на оксид барію суттєво не впливає на емісійну здатність композиції.
4. Зразок гнотового матеріалу, який містив активований барієм циркон, показав емісійну здатність на тому ж рівні, що і інші матеріали, але має значно вищу термічну стійкість.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПИТОМОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ ГРАФІТОВАНИХ ГНОТОВИХ І МОНОЛІТНИХ ЕЛЕКТРОДІВ



Вплив вмісту багатоцільової вуглецевої пасти (МУП) в гноті на питомий електричний опір (ПЕО)



1. При проходженні електричного струму в результаті нагріву відбувається дифузія елементів гноту в тіло електрода. При цьому ПЕО гнотових електродів знижується і при температурах вище 1200...2500 °C стає меншим, ніж ПЕО монолітних графітованих електродів.

2. ПЕО гноту залежить від вмісту в ньому:

- основних компонентів (кращі показники забезпечує TiN, потім стружка від графітованого електрода, доменний графіт);
- матеріалу сполучного (краще МУП в кількості до 15%, потім суміш (пек сполучний і пек просочувальний), гірші показники при пеку сполучному);
- кількості міді (~ 25% в поєднанні з МУП).

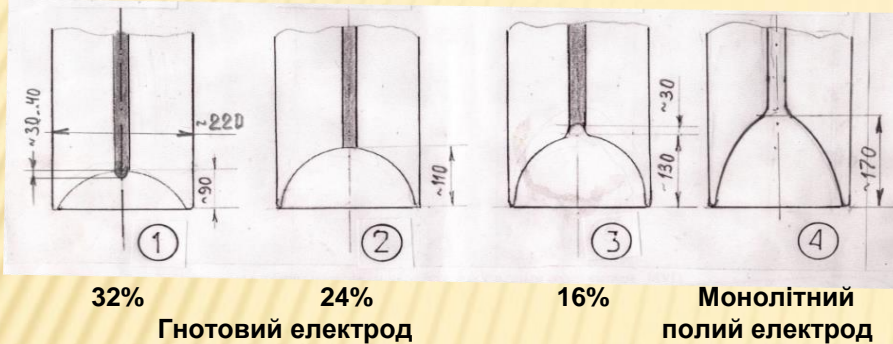
3. Найнижчий питомий електроопір показали струмоводи системи TiN-МУП (2 ... 5 мкОм·м).

4. Низький питомий електроопір мали струмоводи системи TiN-пек-Cu (4 ... 8 мкОм·м).

5. Заміна K_3PO_4 на $K_2Cr_2O_7$ збільшує ПЕО гноту.

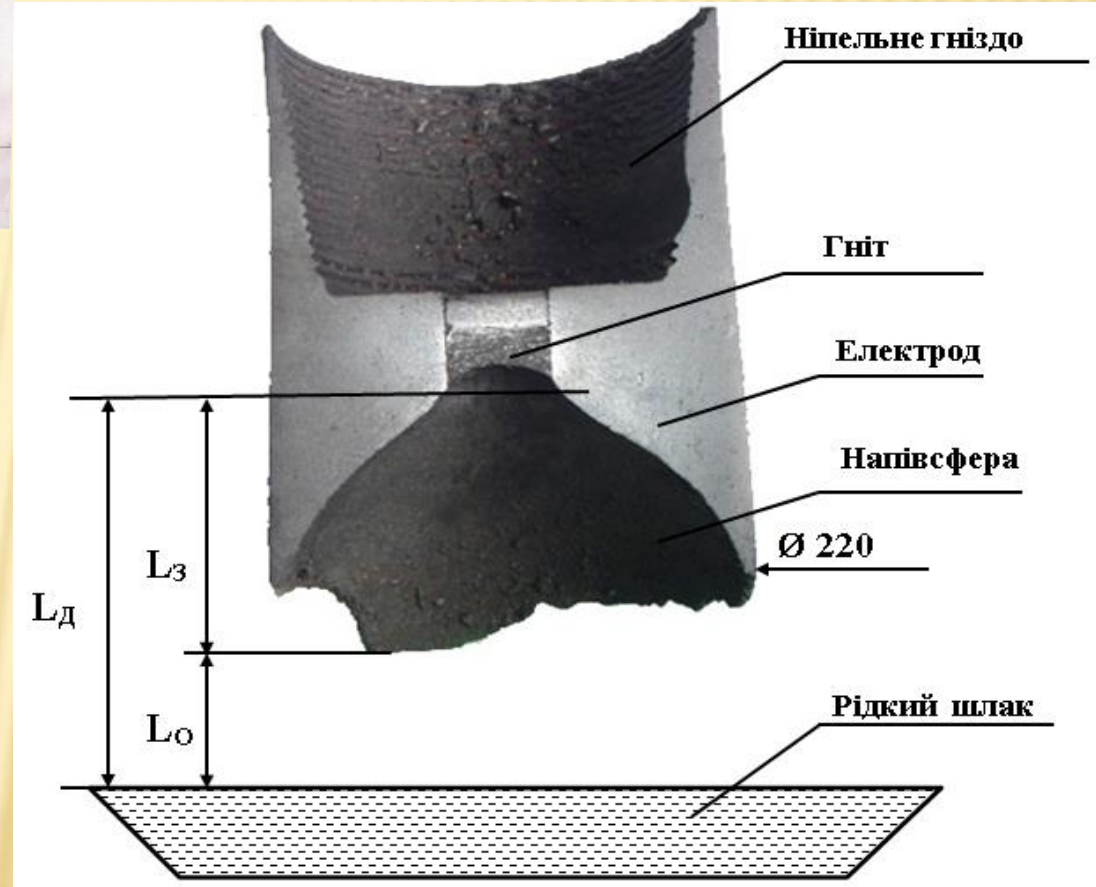
ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНІ ТОРЦЯ ГРАФІТОВАНОГО ГНОТОВОГО ЕЛЕКТРОДА

Вплив вмісту багатоцільової вуглецевої пасти (МУП) в складі гнота на глибину півсфери на торці електрода

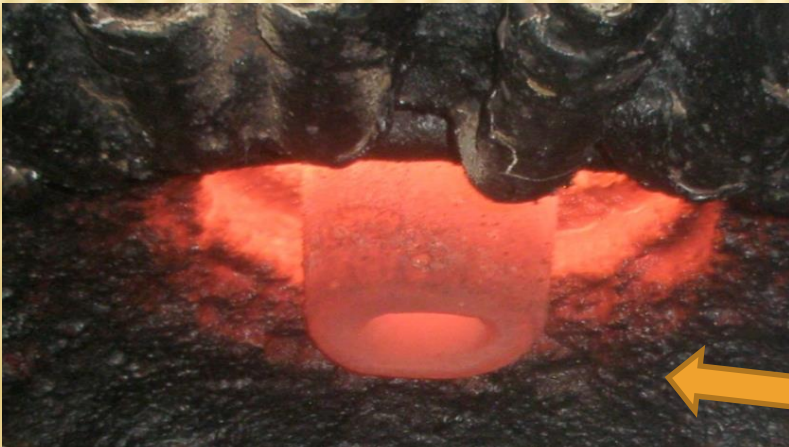


Зі зменшенням ПЕО гнотів (при відповідному зменшенні вмісту МУП від МУП 32% до 16%) зростає густина струму в гноті, досягаючи найбільшого значення при МУП 16%, де швидкість окислення гноту стає вище, ніж тіла електрода, утворюється напівсфера на торці електрода. Це дозволяє концентрувати тепло над розплавом і управляти радіаційним опроміненням стін печі, що сприяє збільшенню стійкості футеровки печі і, тим самим, підвищенню її продуктивності.

Макротемплет гнотового електрода з вихідним діаметром 350 мм і складові довжини дуги гнотового електрода L_D : L_3 , і L_0



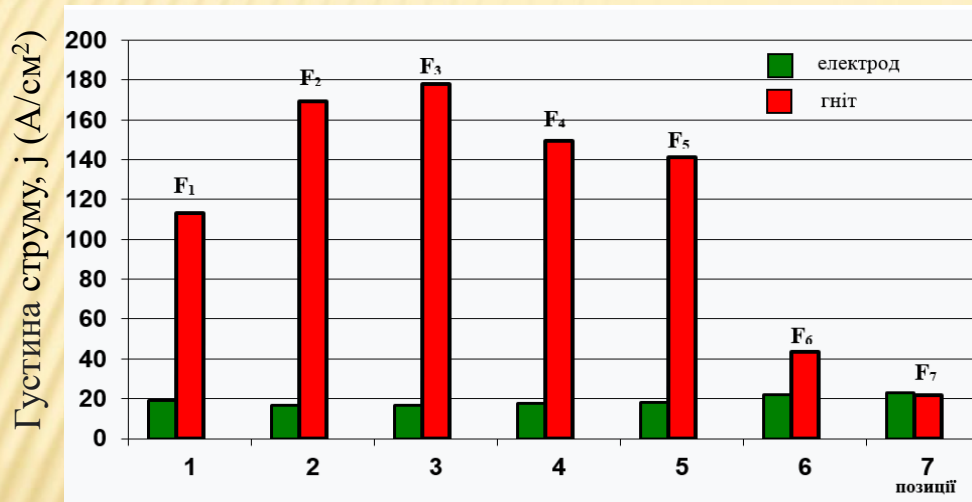
Напівсфера на торці гнотового електрода з вихідним Ø 350 мм на печі ДСП ПТ-12



ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ МІЖ ГНОТОМ І ТІЛОМ ЕЛЕКТРОДІВ

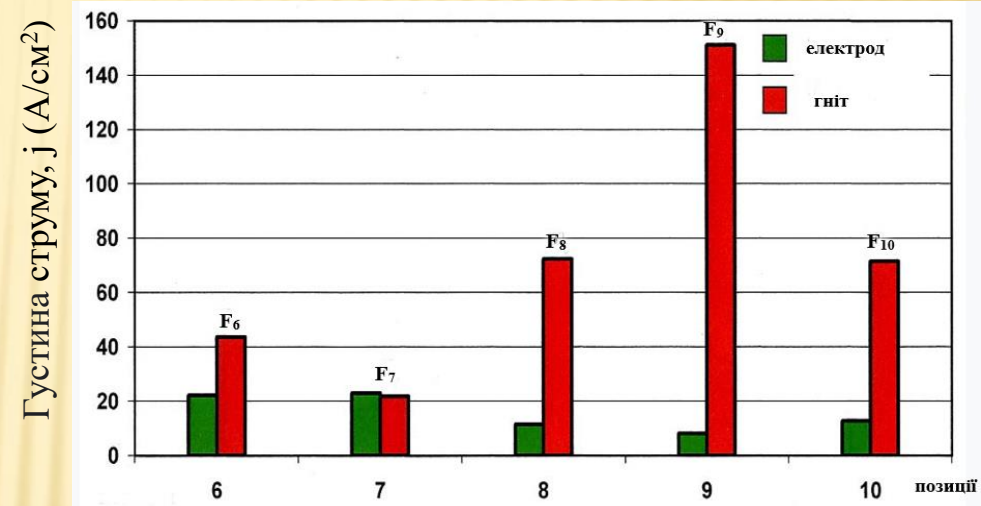
Густина струму в тілі та у гнотах модельних графітованих електродів діаметром 50 мм

при вмісті МУП - 10%, міді - 35% і застосуванні K_3PO_4



1. Гніт базового складу (F_1) може забезпечувати густина струму до $113,2 \text{ A/cm}^2$, що в 5,9 рази більше, ніж у тілі електрода.
2. Добавка до базового складу міді підвищує густина струму в гноті до $170...178,1 \text{ A/cm}^2$, тобто різниця у порівнянні із густиною струму в тілі електрода збільшується в 9,5 разів (F_2 і F_3).
3. Заміна сполучного МУП на пек знижує густина струму в гноті до $149,4$ і $141,3 \text{ A/cm}^2$ (у тілі електрода, відповідно $17,7$ та $18,0 \text{ A/cm}^2$), (F_4 і F_5).
4. Добавки компонентів, що містять елементи з низькою роботою виходу електронів, суттєво знижують густина струму в гноті – до $43,6 \text{ A/cm}^2$ (у тілі електрода $22,1 \text{ A/cm}^2$), (F_7).
5. Заміна половини кількості міді у складі F_6 алюмінієм вирівнює густина струму між тілом електрода і гнотом, (F_7).

при вмісті МУП - 24%, міді - 20% і застосуванні $K_2Cr_2O_7$ і циркону

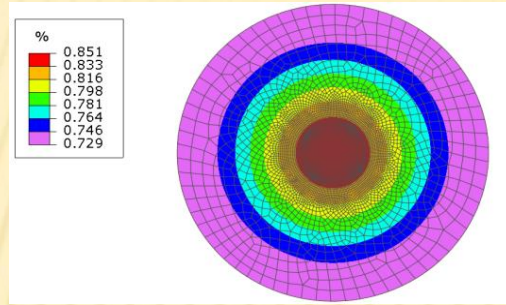
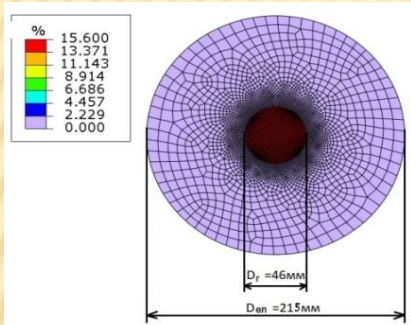


1. В результаті зазначених вище заміни і добавок отримана у гноті густина струму 70 A/cm^2 , що в 4,4 рази перевищує густина струму в електроді (16 A/cm^2) (F_8).
2. Найбільшу густина струму (порядку 150 A/cm^2) має гніт з цирконом (F_9).
3. Гноти без циркону (F_8 і F_{10}) мали, орієнтовно, однакову густина струму (порядку 70 A/cm^2).

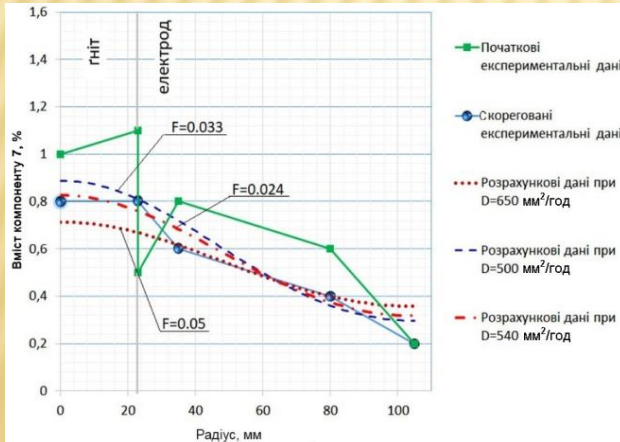
Гноти всіх складів, за винятком гноту з алюмінієм, мають густина струму істотно більшу (до 9,5 разів), ніж тіло електрода.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДИФУЗІЇ ДОМІШОК В ГРАФІТОВАНОМУ ГНОВОМУ ЕЛЕКТРОДІ НА ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧАХ

Двовимірний кінцево-елементний розподіл дифузії в поперечному перерізі гнотового електрода в печі ДСП ПС-12: а) концентрація Cu у початковому стані; б) після 3 годин роботи електрода.

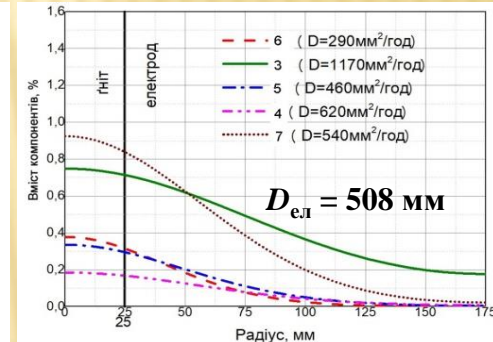
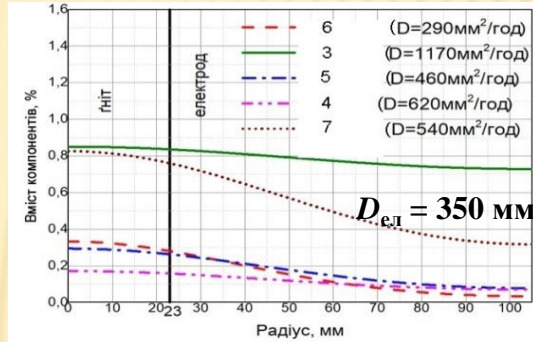


Експериментальні і розрахункові розподіли вмісту Ті в залежності від радіальної координати електрода з вихідним діаметром 350 мм після 3 годин роботи печі



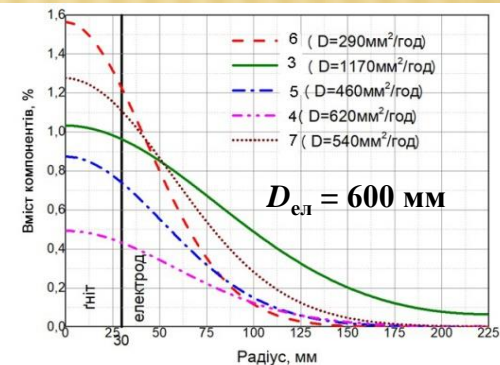
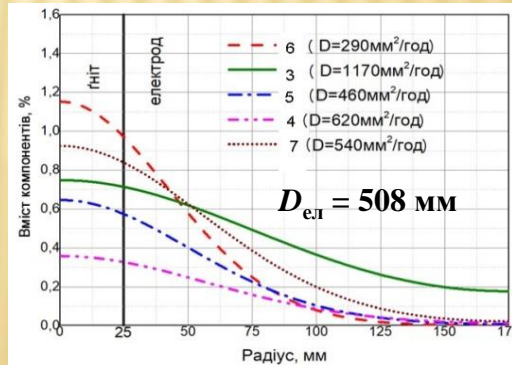
На основі розробленої моделі і експериментальних даних розподілу вмісту хімічних елементів в гноті (Cu, K, Cr, Ba, Ti) у початковому стані та після 3 годин роботи гнотового електрода з вихідним діаметром 350 мм, шляхом чисельних експериментів ітеративно визначені коефіцієнти дифузії для кожного компоненту за умови максимального збігу за найменших квадратичних відхилень з експериментальними даними при завершенні роботи електрода в дуговій печі постійного струму.

Розрахунковий вміст елементів (3 – Cu, 4 – K, 5 – Cr, 6 – Ba, 7 – Ti) в гнотових електродах різних діаметрів та значення коефіцієнтів дифузії після 3 годин роботи печі



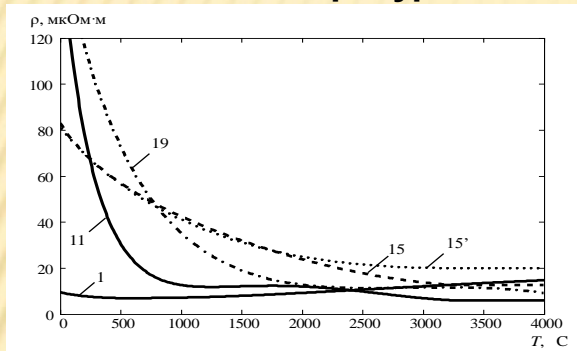
В результаті моделювання отримано досить низький вміст деяких елементів (K, Cr, Ba) в електродах збільшених діаметрів 508 мм та 600 мм після 3 годин роботи в печі і для цих діаметрів електродів збільшено їх вихідний вміст у гнотах промислових електродів (див. Таблицю).

Умови експерименту	Вміст компонентів, %				
	Cu	K	Cr	Ba	Ti
початкові	15,6	2,0	2,75	2,1	9,4
за результатами моделювання	15,6	4,0	5,5	6,6	9,4

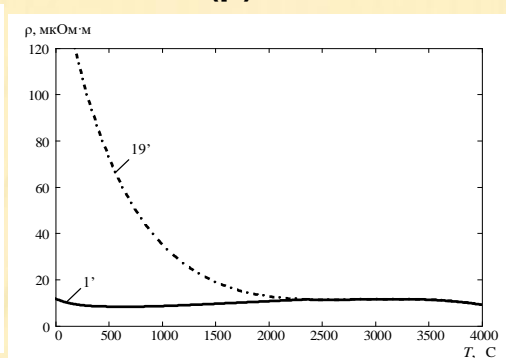


МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ГРАФІТОВАНИХ ҐНІТОВИХ І МОНОЛІТНИХ ЕЛЕКТРОДАХ ДЛЯ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Температурні залежності ПЕО (ρ):



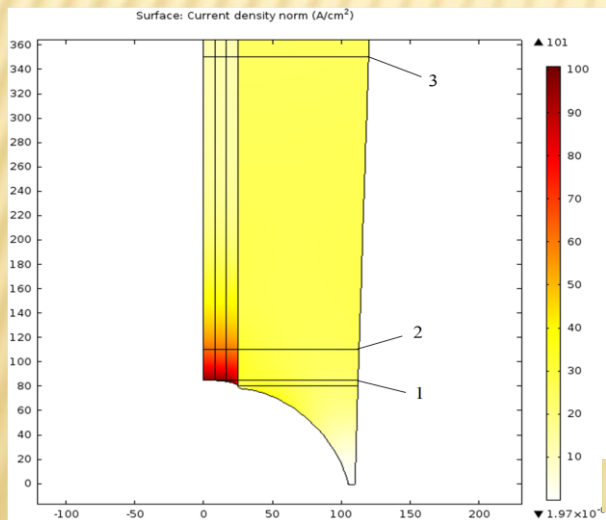
а



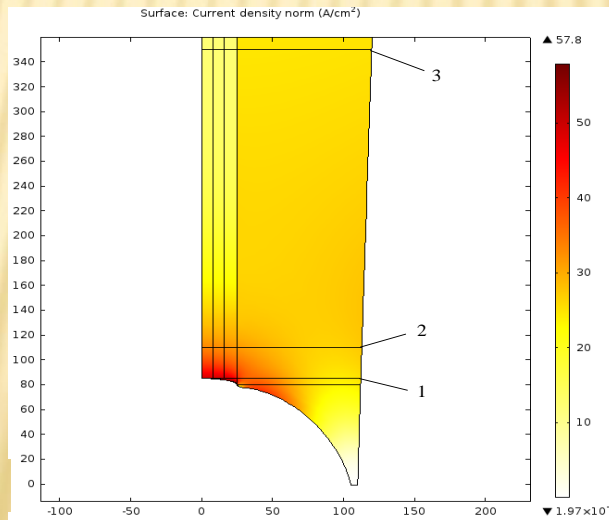
б

1, 1' – матеріалів тіл монолітних графітованих електродів; 11, 15, 15', 19, 19' – матеріалів ґнотів.
 (а) – при наявності незначних дифузійних процесів між матеріалами тіл електродів і ґнотів при високих температурах (вище 2000 °С); (б) – при повній дифузії елементів (температурі вище 2400 °С)

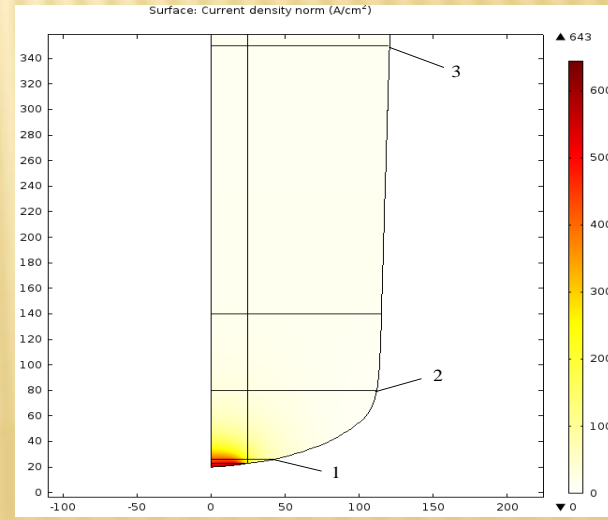
Розподіл густини електричного струму в електродах корелюється із їх ПЕО при різних температурах. При проходженні електричного струму в результаті нагріву відбувається дифузія елементів ґноту в тіло електрода, ПЕО ґнотових електродів знижується і стає меншим, ніж ПЕО тіла електрода. Це впливає на перерозподіл густини струму між ґнотом і тілом електрода. На ділянках з більшими значеннями ПЕО ґнотів густина струму в них менша, ніж в графітованому тілі самого електрода на прилеглих ділянках і навпаки. Найбільша густина струму спостерігається поблизу катодної плями монолітного електрода, в 6,4 - 11,1 разів більше в залежності від ступеня завершеності дифузійних процесів, ніж в прикатодній плямі ґнотового електрода.



а



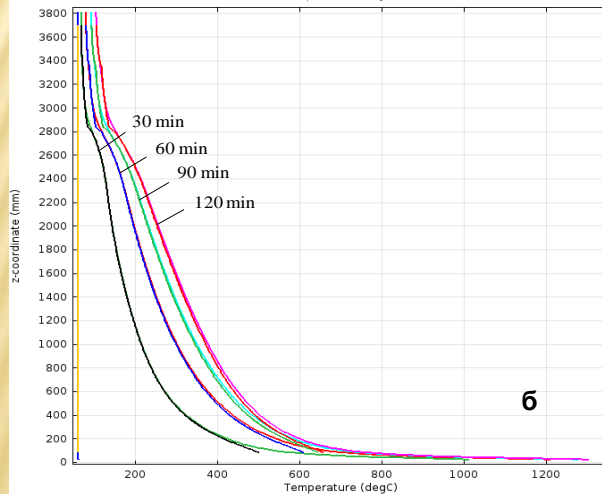
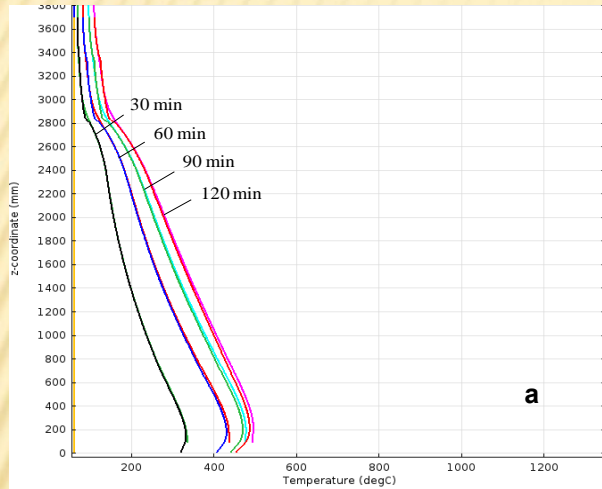
б



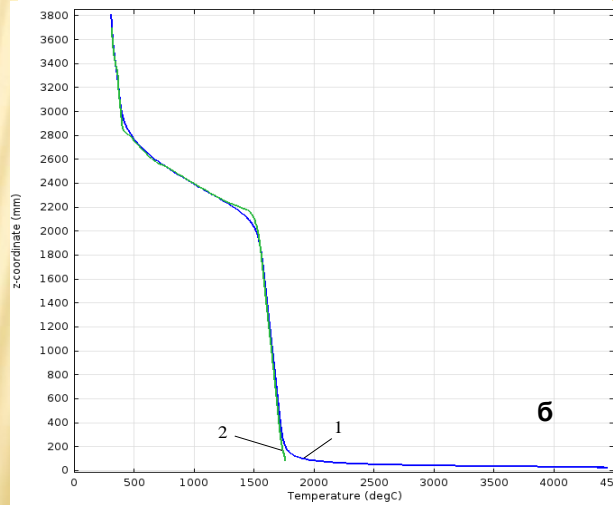
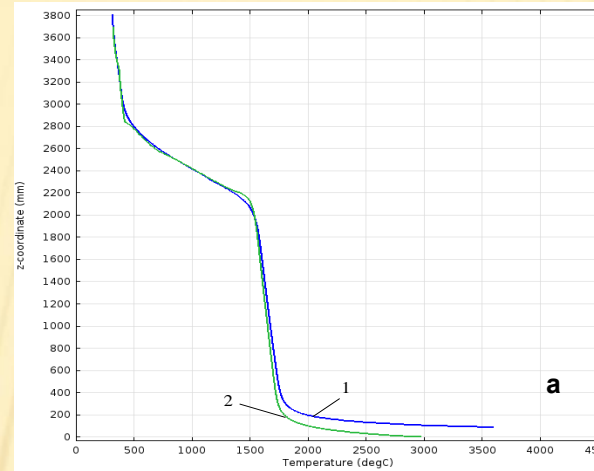
в

Розподіл густини електричного струму в електродах із складом ґноту 19 – (а) при частковій дифузії елементів; 19' – (б) при повній дифузії елементів; в монолітному електроді – (в)

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ГРАФІТОВАНИХ ҐНТОВИХ І МОНОЛІТНИХ ЕЛЕКТРОДАХ ДЛЯ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ



Криві нагріву по висоті ґнтового електроду із складом ґноту 11 – (а) монолітному електроді – (б) при нагріванні струмом 11 кА з 20 °С на відкритому повітрі



Криві нагріву по висоті ґнтового електроду із складом ґноту 11 – (а) монолітному електроді – (б) при роботі в печі

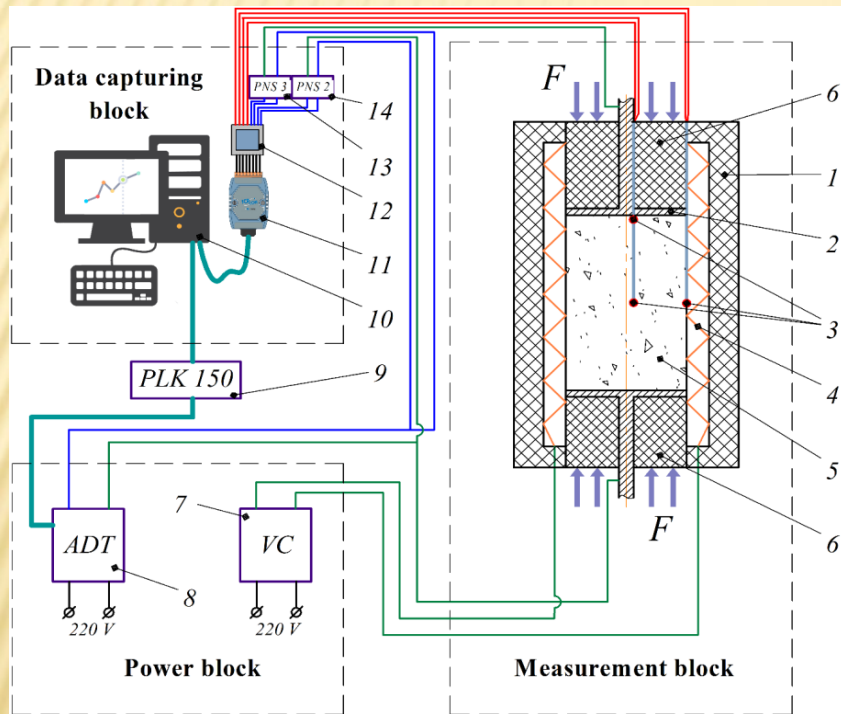
1. При проходженні електричного струму крізь електроди температура торцевої частини ґнтових електродів складала 495 °С, а монолітного 1305 °С. Усереднені питомі резистивні електричні втрати у всьому об'ємі електродів при тих же умовах і струмі 11 кА для ґнтового електроду 0,105 Вт/см³, а для монолітного електроду - 0,208 Вт/см³, тобто в ґнтовому електроді вони вдвічі нижчі, що обумовлено концентрацією густини струму у катодній плямі.

2. При роботі електродів в печі (з урахуванням впливу на електрод температур катодної плями дуги, розплаву, пічних газів і стінок печі) розраховані усереднені питомі резистивні електричні втрати в досліджених ґнтових електродох (0,125...0,134 Вт/см³) менші, ніж у монолітного електроду (0,198 Вт/см³) на 32...37%.

3. При підвищенні струмового навантаження в ґнтових електродох в процесі плавлення на 5,7...6,1% до зрівняння електричних втрат в ґнтових і монолітних електродох, можна підвищити продуктивність плавлення сталі і отримати економію електричної енергії.

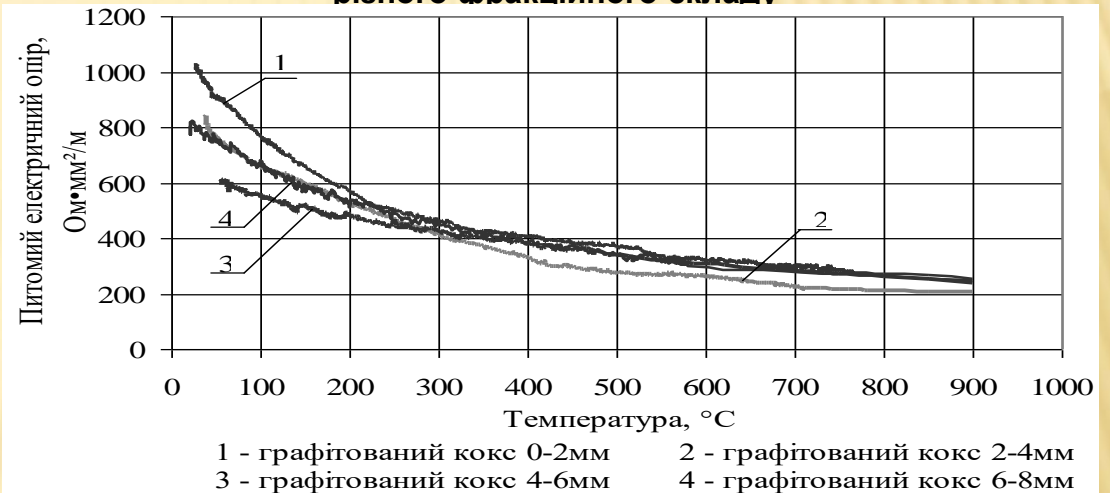
УДОСКОНАЛЕННЯ ВИБОРУ СИРОВИННОЇ БАЗИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ МОНОЛІТНИХ ГРАФІТОВАНИХ ЕЛЕКТРОДІВ

Схема установки
для визначення питомого електричного опору (ПЕО)
вуглецевих сипучих матеріалів до 1000 °С



1 – радіальна теплоізоляція; 2 – графітовий електрод;
3 – термопари; 4 – спіральний нагрівач;
5 – досліджуваний матеріал; 6 – торцева теплоізоляція;
7 – регулятори напруги спірального нагрівача; 8 – регулятори напруги вимірювальної секції; 9 – програмований контролер;
10 – блок обробки та реєстрації інформації (ПК); 11 – аналого-цифровий перетворювач; 12 – комутаційний пристрій; 13 – перетворювач струму; 14 – перетворювач напруги.

Температурна залежність питомого електричного опору
графітованого коксового дріб'язку
різного фракційного складу

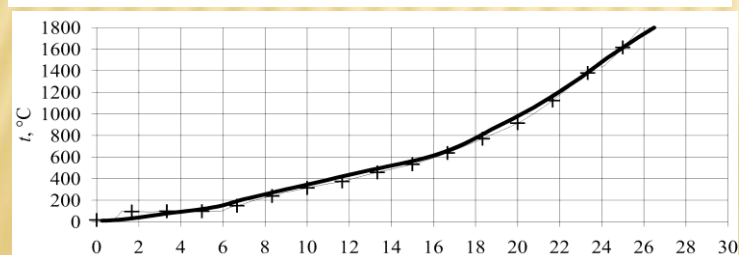
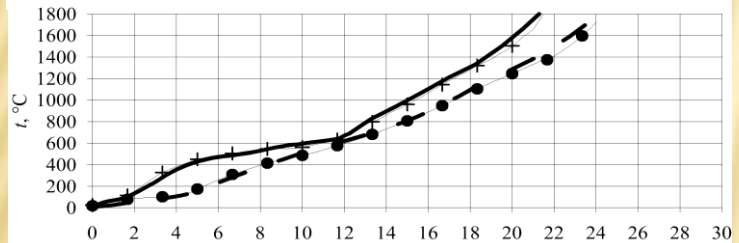
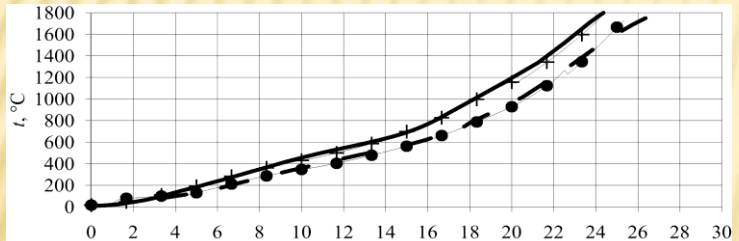
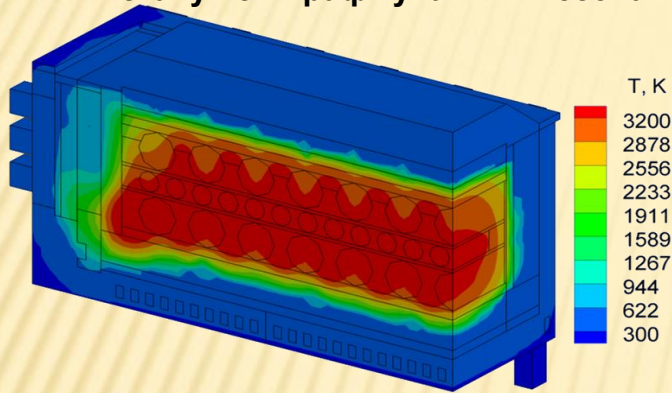


Результати впровадження рекомендацій НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» по вибору сировинної бази для виготовлення монолітних графітованих електродів на ПрАТ «Укрграфіт»

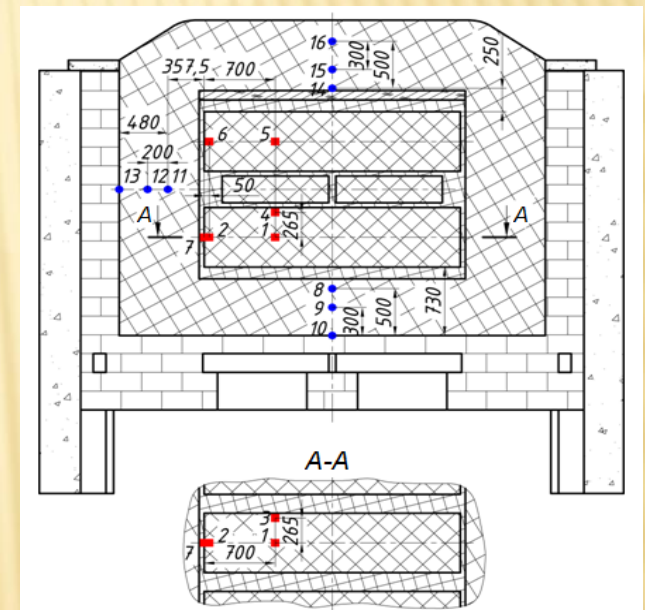
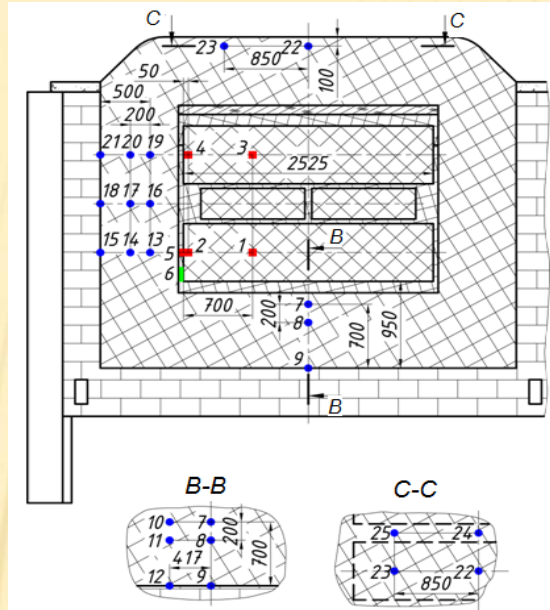
1. Використання голчастого коксу для виготовлення електродів великих діаметрів (500–600 мм) дозволяє збільшити густину електричного струму на електродах для сталеплавильних печей з 18–20 А/см² до 25–30 А/см².
2. При нагріванні коксового дріб'язку до 900 °С значення ПЕО для усіх фракцій лежить в межах 205–260 Ом·мм²/м, причому найнижче значення відповідає фракції 2–4 мм.
3. Застосування високотемпературного пеку дозволяє знизити окиснюваність електродів при експлуатації на 5–10 %.
4. Просочення електродів сланцевим (смоляним) пеком, який утворює кокс більш високої бальності (4,5 проти 3,7 у кам'яновугільного пеку), тобто кокс із більш удосконаленою структурою графіту, дозволяє підвищити стійкість електродів до окиснення і знизити їх питомий електричний опір з 5,0–6,0 мкОм·м до 4,0–5,5 мкОм·м.

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ГРАФІТУВАННЯ МОНОЛІТНИХ ЕЛЕКТРОДНИХ ЗАГОТОВОК

Верифікація числової моделі термоелектричного стану печі графітування Ачесона



Експериментальні дослідження термоелектричного стану діючих печей графітування Ачесона змінного та постійного струму



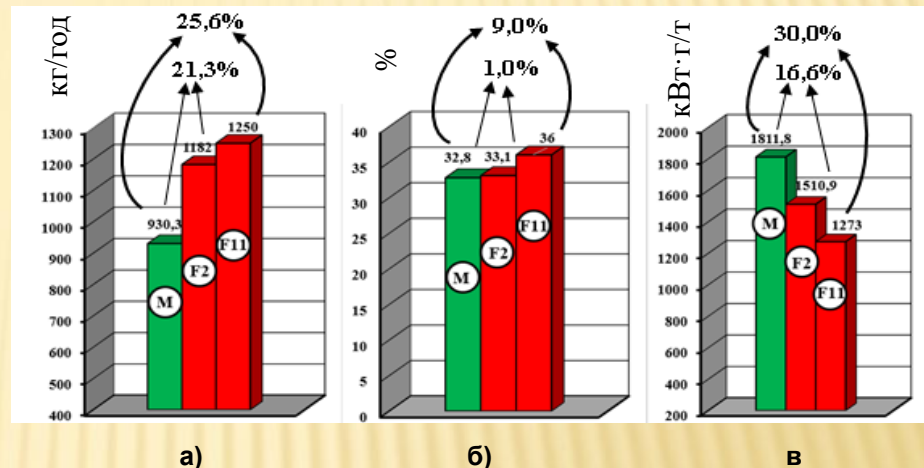
Науковцями НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» вдосконалено і впроваджено на ПрАТ «Укрграфіт» технологію графітування вуглецевих заготовок в печах Ачесона і Кастнера. На основі розробленої чисельної моделі визначення термоелектричного та механічного стану печей графітування Ачесона і Кастнера створено систему науково обґрунтованих критеріїв для опису нормативів електропостачання в печах графітування. Досягнуто такі результати:

- 1) витрати електроенергії на одну кампанію печі зменшилися на 10% при заданих показниках якості графітованих виробів;
- 2) вихід графітованих електродів, ПЕО яких відповідає світовим стандартам (до 4,0–5,5 мкОм·м), становить до 96-98%;
- 3) продуктивність збільшилася на 15-20 % за рахунок інтенсифікації графіка електропостачання печей графітування.

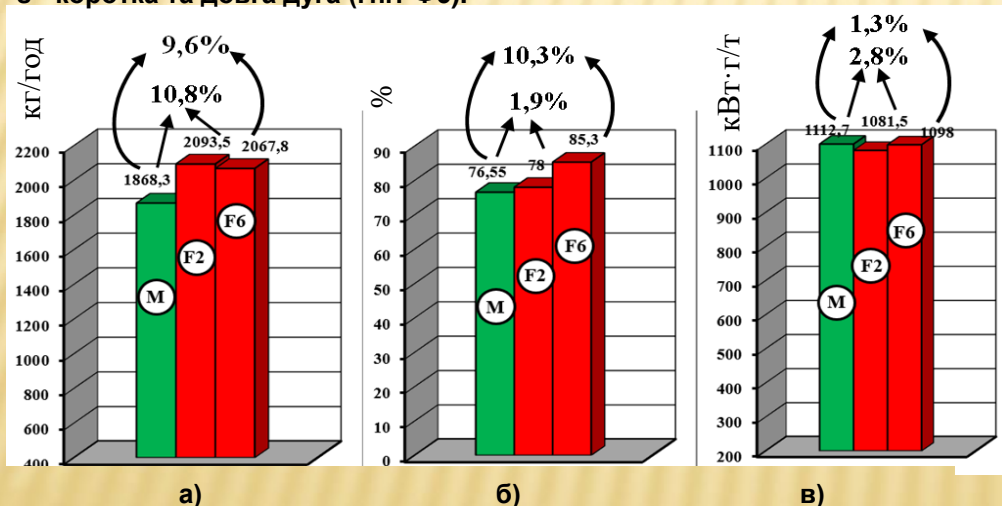
РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ ґНОТОВИХ ЕЛЕКТРОДІВ НА ДСП ПС-12 ТОВ «ФЕРОКС»



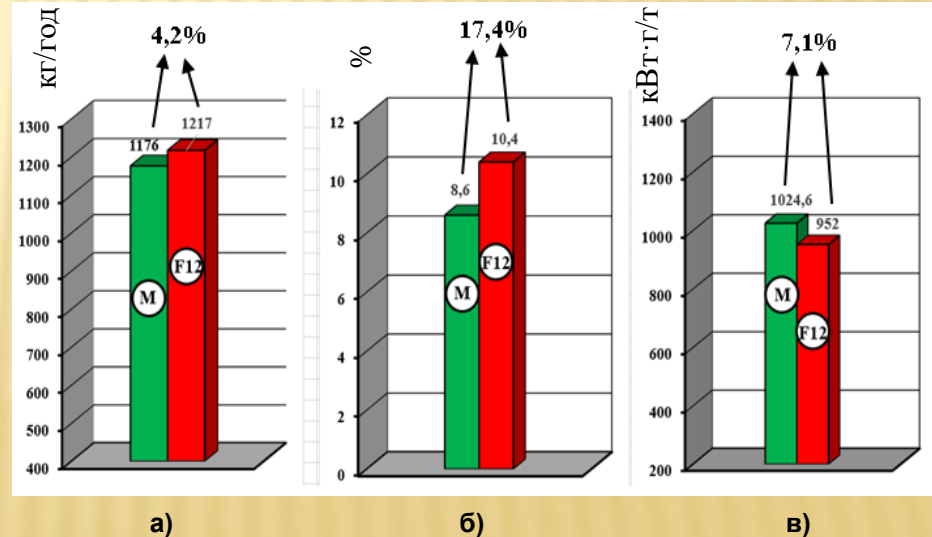
Питома витрата активної електроенергії (кВт·год/пл) на плавках 70 % FeSiMn з ґнотовими електродами на короткій та довгій дузі, де: а - серійна (синя) та довга (червона) дуга (електрод Ф1); б - коротка та довга дуга (електрод Ф2); в - коротка та довга дуга (ґніт Ф5).



Продуктивність печі (а), вихід металевої фази (зниження чаду Fe, Ni, Mo), % (б) та витрата електроенергії (в) при переплаві каталізатора із застосуванням монолітних (М) та ґнотових (F₂ та F₁₁) електродів



Переплав металевої фази (злитків) із максимально високим вмістом Ni та Mo із застосуванням монолітних (М) та ґнотових (F₂ та F₆) електродів.



Виплавка ферованадію при використанні монолітних (М) та ґнотових (F₁₂) електродів.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ЗАСТОСУВАННЯ ГНТОВИХ ЕЛЕКТРОДІВ Ø350 ММ НА 12-ТОННИХ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ (ДСП ПС-12)

Гнотові електроди у порівнянні з монолітними забезпечують:

ЕНЕРГЕТИКА

1. Висока стабільність дуги на серійних та дослідних режимах плавки;
2. Зниження питомої витрати активної електроенергії, кВт/т до 30%;
3. Зниження реактивної потужності до 23%;
4. Підвищення $\cos \varphi$ з 0,88 до 0,94.

ТЕХНОЛОГІЯ

1. Скорочення розкиду часу плавки (підвищення стабільності) у 2...2,5 рази;
2. Збільшення продуктивності печі на 25,6%;
3. Зниження угару Ni та Mo при переплаві та рафінуванні злитків на 10,3%;
4. Зниження угару ванадію при виплавці 50% ферованадія на 17,4%;
5. Зниження загального угару шихти, середнє, до 3%.

ЕКОЛОГІЯ

1. Зниження рівня шуму печі на 7...10%;
2. Зниження кількості викидів пилу та газів на 8...12%.

Загальний вигляд печі ДСП ПС - 12

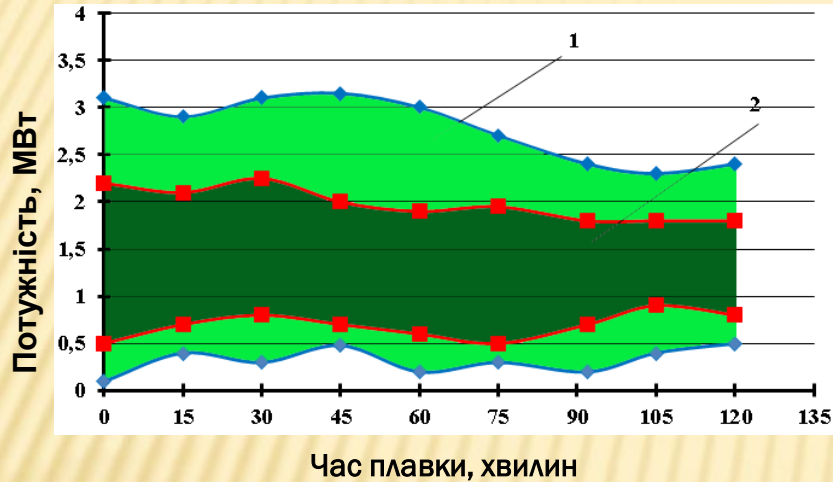


Загальний вигляд гнотового електрода
Ø 350 мм на печі ДСП ПС - 12



ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА 6-ТОННИХ ПЕЧАХ ЗМІННОГО СТРУМУ ДС-6Н1

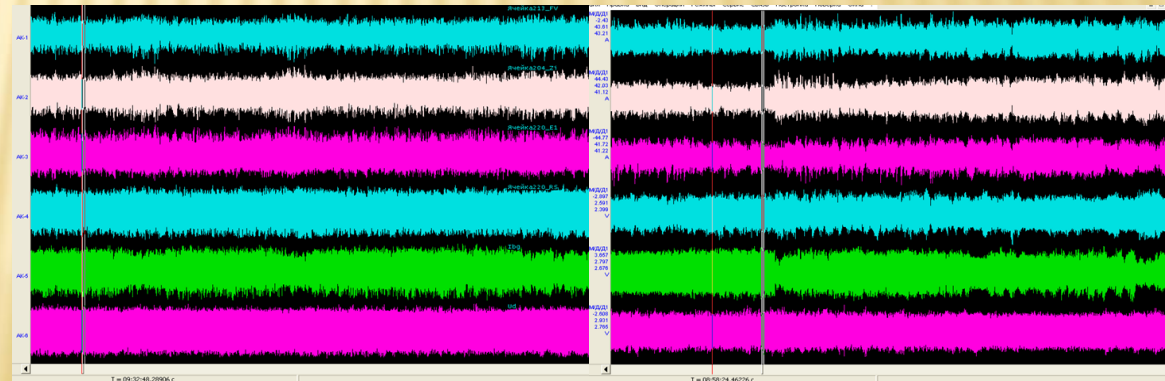
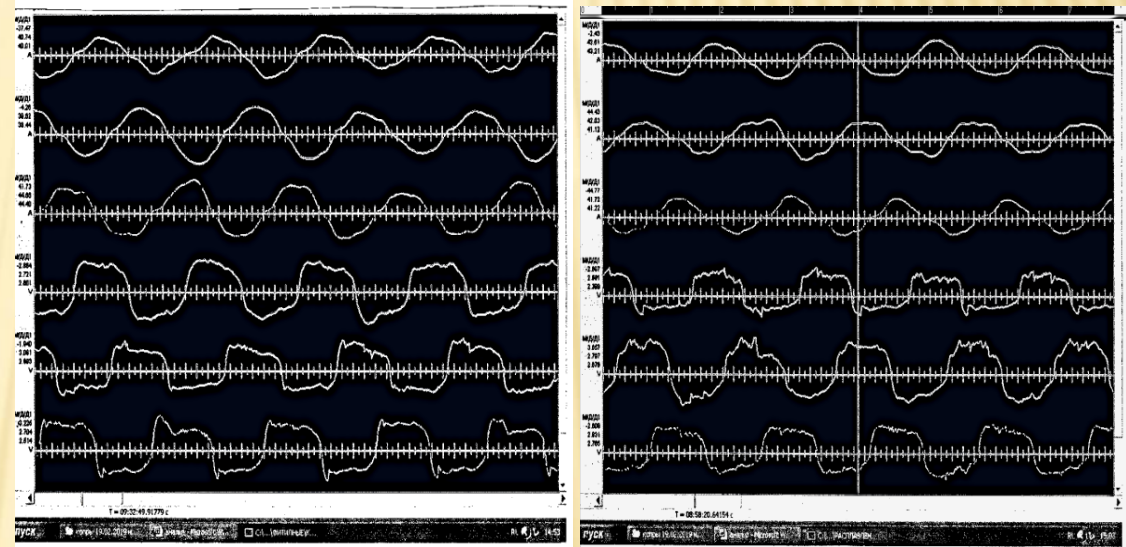
Діапазон розкиду потужності з використанням монолітних (1) та гнотових (2) електродів



Гнотові електроди у порівнянні із монолітними забезпечують:

- зменшення часу від першого короткого замикання при включенні печі до стійкого горіння дуги в 2,75...5,4 рази;
- при роботі на довгих дугах (підвищеній напрузі і зниженому струмі) $\cos \varphi$ збільшується з 0,81...0,86 до 0,91...0,94, а коефіцієнт гармонік струму (зниження частоти та рівня збурень в первинну мережу) знижується з 0,65...0,59 до 0,28...0,09.

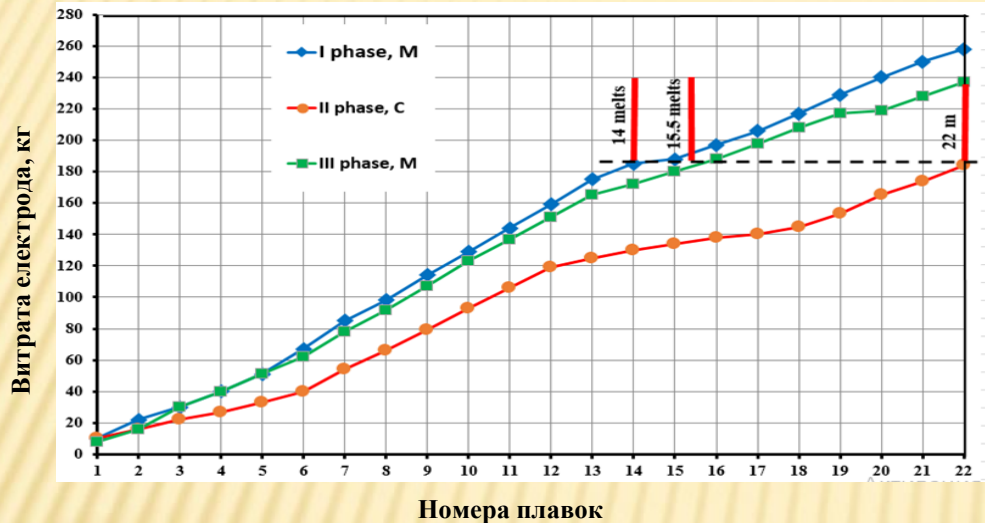
Осцилограми напруги (зверху) та струму (внизу) в період проплавлення «колодязів»



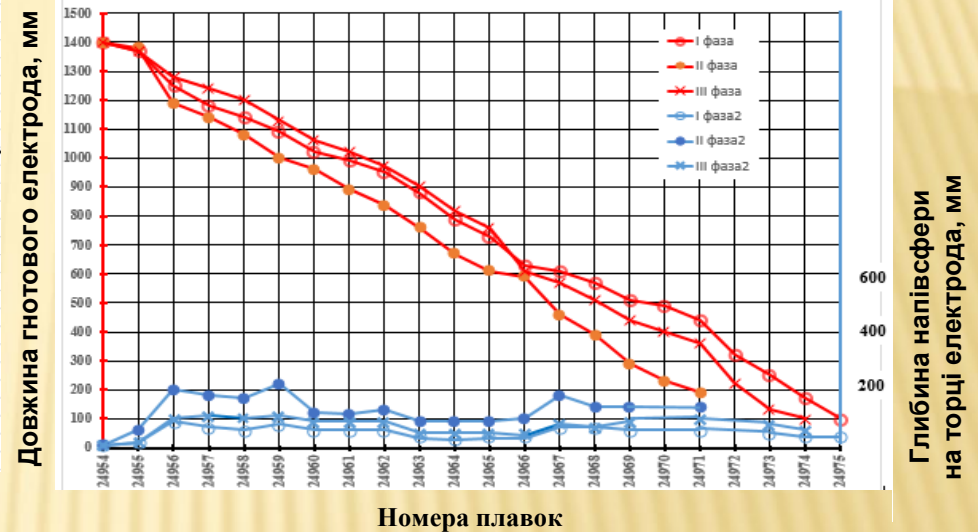
ГНОВІ

МОНОЛІТНІ

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ПЛАВОК НА 6-ТОННІЙ ПЕЧІ ЗМІННОГО СТРУМУ ДС-6Н1 З ВИКОРИСТАННЯМ ГНТОВИХ ГРАФІТОВАНИХ ЕЛЕКТРОДІВ Ø300 ММ



Інтенсивність окислення (угар) електродів



Динаміка окислення гнотових електродів III серії (ліва шкала) і зміна глибини напівсфери на торцях електрода (права шкала)

Гнотові електроди у порівнянні із монолітними забезпечують:

ТЕХНОЛОГІЯ

1. Зниження питомих витрат графітованих електродів (кг/т), в середньому,
2. Збільшення продуктивності печі, в середньому,
3. Економія питомої витрати електроенергії, в середньому,

на 18%;
на 23%;
на 10%.

МЕТАЛУРГІЯ

1. Зниження угару легуючих та феросплавів
2. Зниження угару шихти

до 6%;
на 2...3%.

ЕКОЛОГІЯ

1. Зниження рівня шуму печі
2. Зниження кількості викидів пилу та газів

на 8...10%;
на 7...12%.

Глибина напівсфери
на торці електрода, мм

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ПЛАВОК НА 50-ТОННІЙ ПЕЧІ ЗМІННОГО СТРУМУ ДСВ-50 ПРАТ «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ» З ВИКОРИСТАННЯМ ГНОТОВИХ ГРАФІТОВАНИХ ЕЛЕКТРОДІВ Ø508 ММ

ЕНЕРГЕТИКА

1. Найменший, в середньому, на 50%, час стабілізації дуг на проплавленні «колодязів» і розплавленні шихти.
2. Менший, на 30...50%, діапазон розкиду струмів по фазах у період проплавлення «колодязів» і розплавлення шихти.
3. Найменші коефіцієнти гармонік струму при проплавленні «колодязів» (середнє 20%) та на рідкому металі (середнє 25%).
4. Найменші викривлення синусоїдальних кривих струму в основні періоди плавки.

ТЕХНОЛОГІЯ

1. Зниження питомої витрати графітованих електродів (кг/т) залежно від складу ґнотів, якості вихідних (монолітних) електродів та виду шихти на 16,1...31,4%;
2. Збільшення продуктивності печі, (т/год) на 18...27%;
3. Економія активної електроенергії (кВт·год/т) на 7...16,7%.

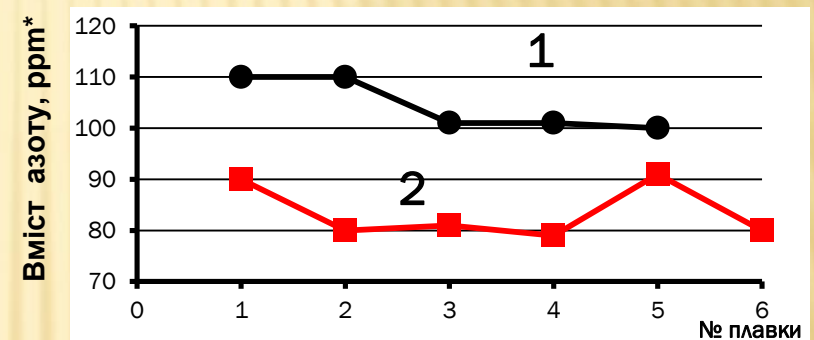
МЕТАЛУРГІЯ

1. Зниження вмісту азоту у сталі, у середньому, на 19%;
2. Зниження угару легуючих та феросплавів на 4...6%;
3. Зниження загального угару шихти на 3...4%.

ЕКОЛОГІЯ

1. Зниження рівня шуму печі на 7...10%;
2. Зниження викидів пилу та газів на 8...12%.

Вміст азоту в сталі 30ХГСА при виплавленні: на монолітних (1) і ґнотових електроджах (2)



Фрагмент роботи печі ДСВ-50
з ґнотовими електродами Ø508 мм

НАУКОВА НОВИЗНА РОБОТИ

«КОМПОЗИТНІ (ГНОВІ) ГРАФІТОВАНІ ЕЛЕКТРОДИ ДЛЯ ПРОМИСЛОВИХ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ»

1. Вперше встановлені фундаментальні властивості потужнострумової електричної дуги графітованих електродів з гнотами, що містять сполуки хімічних елементів I і II групи Періодичної системи Д. Менделєєва з низькою роботою виходу електронів:
 - електрична дуга гнотового електрода принципово відрізняється від дуги монолітного електрода за геометричними та електричними параметрами. Тому всі показники струму та потужності дуги, що відносяться до одиниці поверхні або об'єму дуги у гнотового електрода завжди істотно нижчі, ніж у дуги монолітного електрода;
 - падіння напруги в прикатодній області гнотового електрода завжди в 2...3 рази менше, ніж в прикатодній області монолітного електрода незалежно від складу гноту, геометричних і електричних параметрів дуги;
 - однакова сила струму дуги забезпечується при напрузі на дузі в 1,5...2,5 рази меншій на гнотовому електроді, ніж на монолітному. При рівних напругах на дугах сила струму гнотового електрода в 1,5...2,0 рази вище сили струму монолітного електрода;
 - при однакових електричних параметрах довжина дуги гнотового електрода в 1,3...1,5 рази більша, ніж монолітного електрода.
2. Збільшення вмісту в гноті до 6...10 % сполук елементів I і II групи Таблиці Менделєєва з низькою роботою виходу електронів в 1,6...8,0 разів підвищує силу катодного струму електронної термоемісії в вакуумі.
3. При проходженні електричного струму в результаті нагріву відбувається дифузія елементів в системі «гніт – електрод». При цьому питомий електричний опір (ПЕО) гнотових електродів знижується і при температурах вище 1200...2500 °С стає меншим, ніж ПЕО монолітних графітованих електродів.
4. На основі розробленої двовимірної кінцево-елементної моделі дифузії в поперечному перерізі гнотового електрода в дуговій печі постійного струму і експериментальних даних розподілу вмісту хімічних елементів в гноті (Cu, K, Cr, Ba, Ti) у початковому стані та після 3 годин роботи гнотового електрода з вихідним діаметром 350 мм, шляхом числових експериментів ітеративно визначені коефіцієнти дифузії для кожного компоненту і виконано коригування вмісту K, Cr, Ba в графітованих гнотових електродах збільшених діаметрів (508 та 600 мм) для випробувань на промислових печах.
5. На основі розробленої математичної моделі електричних та теплових полів в графітованих гнотових та монолітних електродах для дугових сталеплавильних печей постійного струму вперше встановлено, що:
 - в результаті проходження електричного струму через електроди температура торцевої частини гнотових електродів склала 495 °С і є суттєво нижчою, ніж у монолітного електрода (1305 °С);
 - при урахуванні впливу на електрод температур катодної плями дуги, розплаву, пічних газів і стінок печі розраховані усереднені питомі резистивні електричні втрати в досліджених гнотових електродах лежать в діапазоні 0,125...0,134 Вт/см³ і вони менші ніж у монолітного електрода (0,198 Вт/см³) на 32...37%.
6. На основі дослідження розподілу електричного струму між гнотом і тілом електрода вперше експериментально встановлено, що густина струму в гноті, в залежності від його складу, істотно більше (від 2,0 до 9,5 разів), ніж в тілі електрода.

ЗАГАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

«КОМПОЗИТНІ (ГНОВІ) ГРАФІТОВАНІ ЕЛЕКТРОДИ ДЛЯ ПРОМИСЛОВИХ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ»

1. Вирішено важливу науково-технічну проблему керування електричними і тепловими процесами в потужнострумових електричних дугах і створено принципово новий для електрометалургії вид продукції – графітовані композитні (гнотові) електроди для промислових дугових сталеплавильних печей, які не мають аналогів в практиці світової електрометалургії.
2. Застосування графітованих гнотових електродів на промислових сталеплавильних печах постійного і змінного струму забезпечує покращення всіх техніко-економічних показників роботи печей:
 - зниження питомої витрати графітованих електродів на 16,1...31,4;
 - економію активної електроенергії на 12,0...30,0%;
 - збільшення продуктивності печі на 7,5 ... 27,0%;
 - зниження втрат легуючих елементів на чад на 6,0...17,4 %;
 - зниження загального чаду шихти на 2,0...3,0% ;
 - зниження рівня шуму печі, викидів пилу і газів на 8,0...12,0 %;
 - збільшення стійкості футерування печі на 20,0...30,0 %.

Ефективність застосування гнотових електродів не залежить від конструкції печі, різновиду електричного струму і ємності дугової сталеплавильної печі.

3. Усі роботи, які проводяться на ПрАТ«Дніпроспецсталь» із застосуванням гнотових електродів, виконуються на сортаменті сталей і сплавів, що постачаються для виготовлення сучасних зразків техніки та озброєння для Збройних Сил України. При використанні гнотових електродів на печах типу ДСВ-50 виплавлено 14 різних марок сталей (вуглецевих, низьколегованих високоміцних, легуваних інструментальних та інших) загальним об'ємом понад 2000 т.

4. Економічний ефект від застосування гнотових електродів на дугових печах становить, в середньому, 562 грн/ т сталі.

5. За підсумками роботи видано 8 монографій; опубліковано 24 статті, в тому числі у виданнях, проіндексованих в базах даних Scopus та Web of Science – 12 статей, одержано 9 патентів.

6. Робота «Композитні (гнотові) графітовані електроди для промислових дугових сталеплавильних печей», спрямована на зниження енерго- і ресурсовитрат, покращення умов праці в металургії і екологічного стану промислового Запорізького регіону. Її метою є підвищення енергетичної, економічної, екологічної безпеки України, її обороноздатності.