**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
(повна найменування вищого навчального закладу)
**ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ**
(назва факультету)
**КАФЕДРА МЕТАЛУРГІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ, ЕКОЛОГІЇ ТА ТЕХНОГЕННОЇ БЕЗПЕКИ**
(повна назва кафедри )

# Кваліфікаційна робота/ проєкт

другий (магістерський) рівень вищої освіти
(рівень вищої освіти)

на тему «Шляхи підвищення стійкості електродів металургійного призначення»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1364- мчм-дн

спеціальності 136 «Металургія»
(код і назва спеціальності)

освітньо-професійна програма «Металургія чорних металів»
(назва освітньої програми)

Дубасов Юрій Олександрович
(ініціали та прізвище)

Керівник доцент, канд. техн. наук, доцент Воденнікова О.С.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент професор, д-р. техн. наук, професор Григор'єв С.М.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2026

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Кафедра *металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*
Рівень вищої освіти *другий (магістерський) рівень*
(другий (магістерський) рівень)
Спеціальність *136 «Металургія»*
(шифр і назва)
Освітньо-професійна програма *Металургія чорних металів*
(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**
Завідувач кафедри *МТЕТБ*
*Ю.О. Бєлоконь*
"__" _____2025 року

# З А В Д А Н Н Я
## НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТУ

*Дубасову Юрію Олександровичу*
**(прізвище, ім'я, по батькові)**

1. Тема проєкту (роботи) *«Шляхи підвищення стійкості електродів металургійного призначення»*

керівник роботи (проєкту) *Воденнікова Оксана Сергіївна, канд. техн. наук, доцент*
( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від *"27" 02 2025 р. № 319-с*

2. Строк подання студентом роботи (проєкта) *09.02.2026р.*

3. Вихідні дані до роботи (проєкта) *Науково-технічна література, ДСТУ, патенти.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Реферат. Вступ. Електроди: види, властивості, приклади застосування та умовні позначення. Основні вимоги до електродів, рекомендації щодо їх вибору. Огляд сьогоденних виробників електродів. Огляд шляхів підвищення стійкості електродів металургійного призначення. Охорона праці та техногенна безпека. Загальні висновки. Перелік джерел посилання.*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) *Титульний лист – 1. Реферат – 1. Вступ – 0. Розділ 1 – 4. Розділ 2 – 1. Розділ 3 – 5. Розділ 4 – 1. Розділ 5 – 0. Загальні висновки – 2.*

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата завдання прийняв |
|---|---|---|
| *Електроди: види, властивості, приклади застосування та умовні позначення* | *Воденнікова О.С., доцент* | |
| *Основні вимоги до електродів, рекомендації щодо їх вибору* | *Воденнікова О.С., доцент* | |
| *Огляд сьогоденних виробників електродів* | *Воденнікова О.С., доцент* | |
| *Огляд шляхів підвищення стійкості електродів металургійного призначення* | *Воденнікова О.С., доцент* | |
| *Охорона праці та техногенна безпека* | *Воденнікова О.С., доцент* | |
| *Нормоконтроль* | *Бєлоконь Ю.О., професор* | |

7. Дата видачі завдання *02.03.2025р.*

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

| № з/п | Назва етапів дипломного проєкту (роботи) | Строк виконання етапів проєкту (роботи ) | Примітка |
|---|---|---|---|
| *1* | *Реферат. Зміст. Вступ.* | | |
| *2* | *Електроди: види, властивості, приклади застосування та умовні позначення* | | |
| *3* | *Основні вимоги до електродів, рекомендації щодо їх вибору* | | |
| *4* | *Огляд сьогоденних виробників електродів* | | |
| *5* | *Огляд шляхів підвищення стійкості електродів металургійного призначення* | | |
| *6* | *Охорона праці та техногенна безпека* | | |
| *7* | *Загальні висновки. Перелік джерел посилання* | | |
| *8* | *Графічна частина* | | |

Студент _____ *Юрій ДУБАСОВ*
( підпис ) (прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи) _____ *Оксана ВОДЕННІКОВА*
( підпис ) (прізвище та ініціали)

# РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка : 81 с., 7 табл., 43 рис., 26 джерел посилання та 1 додаток.

ЕЛЕКТРОД, ГРАФІТОВИЙ ЕЛЕКТРОД, СТІЙКІСТЬ ЕЛЕКТРОДІВ, ЕЛЕКТРОДОТРИМАЧ, ДУГОВА СТАЛЕПЛАВИЛЬНА ПІЧ, ЕЛЕКТРОПІЧ, РУДНОТЕРМІЧНА ПІЧ.

*Тема кваліфікаційної роботи* – шляхи підвищення стійкості електродів металургійного призначення.

*Мета роботи* – проаналізувати сучасні шляхи підвищення стійкості електродів металургійного призначення.

*Поставлена мета в роботі вирішується наступними завданнями*:

– проаналізувати основні вимоги до електродів та надати рекомендації щодо їх вибору;

– привести огляд українських та закордонних графітових електродів;

– надати рекомендації щодо мір підвищення стійкості електродів металургійного призначення.

*Об'єкт дослідження*: різновиди електродів металургійного призначення.

*Предмет дослідження*: технологія виробництва графітових електродів.

*Методи дослідження*: загальні (емпіричні, комплексні та теоретичні) та спеціальні (графічні та кореляційні) методи наукових пізнань.

*Наукова новизна одержаних результатів*: комплексне узагальнення та систематизація сучасних підходів до підвищення стійкості графітових електродів з урахуванням технологічних та експлуатаційних чинників електросталеплавильного виробництва.

*Практичне значення одержаних результатів*: матеріали представленої роботи можуть бути впроваджені в освітній процес Запорізького національного університету при читанні лекцій з навчальної дисципліни «Теорія та технологія

електросталеплавильного виробництва» під час читання лекції за темою «Устрій дугової сталеплавильної печі» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю G10 «Металургія» очної (денної) та заочної (дистанційної) форм здобуття освіти.

*Апробація результатів роботи*. Основні положення роботи доповідались і обговорювались на 1 конференції (Воденнікова О. С., Воденніков С. А., Дубасов Ю. О. Шляхи підвищення стійкості електродів. *Наука і металургія* : Всеукраїнська науково-технічна конференція : збірник тез (Дніпро, 19–20 листопада 2025р.). Дніпро : -, 2025. С. 33.

# ЗМІСТ

ВСТУП…..…….. 8
1 ЕЛЕКТРОДИ: ВИДИ, ВЛАСТИВОСТІ, ПРИКЛАДИ ЗАСТОСУВАННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ…… 9
1.1 Класифікація електродів, їх призначення…… 9
1.1.1 Класифікація електродів для електропечей…… 9
1.1.2 Класифікація зварювальних електродів……. 12
1.2 Електроди для електропечей…… 13
1.2.1 Основні характеристики електродів для електропечей ……. 13
1.2.2 Технологія виробництва графітових електродів…… 18
1.3 Електроди для зварювання…….. 25
1.4 Застосування графітових ґнотових електродів на ДСП постійного струму 28
2 ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ЕЛЕКТРОДІВ, РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЇХ ВИБОРУ……..……. 32
3 ОГЛЯД СЬОГОДЕННИХ ВИРОБНИКІВ ЕЛЕКТРОДІВ…… 39
3.1 Графітові електроди ПрАТ «Український графіт» ……...… 39
3.2 Огляд світових виробників графітових електродів…… 45
4 ОГЛЯД ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРОДІВ МЕТАЛУРГІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ……. 57
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТАТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА…… 64
5.1 Заходи безпеки при використанні графітових електродів електропечей…….…… 64
5.2 Засоби індивідуального захисту при використанні графітових електродів електропечей……. 65
5.3 Заходів безпеки при виконанні зварювальних робіт……..…….. 67
5.4 Засоби індивідуального захисту при виконанні зварювальних робіт… 69
5.5 Техногенна безпека…… 70
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……. 73

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ…… 75
ДОДАТКИ……... 79
ДОДАТОК А ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА…… 79

# ВСТУП

Сьогоденне виробництво графітових електродів характеризується високим рівнем технологічної автоматизації та орієнтацією на потреби електросталеплавильного виробництва, зокрема їх застосування в дугових сталеплавильних печах та руднотермічних печах. Основними виробниками графітових електродів залишаються компанії з Китаю, Індії, ЄС та США, при цьому Китай утримує найбільшу частку світового ринку. Цінова політика на графітові електроди дуже залежить від їх типу (RP, HP, UHP), діаметра та якості матеріалу, а також від ринкових умов і постачальника і може бути в межах від $2 200 до $3 300 за тонну.

Сучасний ринок графітових електродів залишається чутливим до коливань цін на сировину та змін у світовій металургійній галузі. При цьому значна увага приділяється підвищенню стійкості електродів до окиснення, зниженню питомої витрати та збільшенню механічної міцності. У металургійне виробництво активно впроваджуються цифрові технології контролю якості та моделювання структури матеріалу. В умовах глобальної декарбонізації зростає попит на розвиток електросталеплавильного виробництва, що відповідно збільшить попит на виробництва графітованих електродів як елемента конструкції дугових сталеплавильних печей та руднотермічних печей. Водночас виробники металопродукції стикаються з екологічними вимогами щодо зниження викидів під час випалу та графітації.

Саме тому проблема пошуку шляхів підвищення стійкості електродів металургійного призначення є вельми актуальною проблемою для металургійної галузі і потребує вирішення.

# 1 ЕЛЕКТРОДИ: ВИДИ, ВЛАСТИВОСТІ, ПРИКЛАДИ ЗАСТОСУВАННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

## 1.1 Класифікація електродів, їх призначення

### 1.1.1 Класифікація електродів для електропечей

Електроди для електросталеплавильних печей класифікують наступний чином:

1. За матеріалом виготовлення:

– Графітові електроди (рис. 1.1) (найпоширеніші в сучасних ДСП. Виготовляються з коксу та графіту, проходять високотемпературну графітацію (до 2500−3000 $^0$C), що забезпечує низький питомий опір, високу теплопровідність та термостійкість).

– Вугільні електроди (рис.1.3) (менш поширені зараз, виготовляються з вуглецевих матеріалів (антрацит, кокс) та мають нижчу електропровідність і міцність порівняно з графітованими електродами).

– Самообпалювальні або самоспікливі електроди (рис. 1.4) (являють собою сталевий кожух, заповнений електродною масою, яка спікається безпосередньо під час роботи печі від її тепла).

2. За якістю та характеристиками (для графітованих електродів):

- RP (Regular Power): Звичайна потужність.
- HP (High Power): Висока потужність.
- SHP (Special High Power): Спеціальна висока потужність.
- UHP (Ultra High Power): Надвисока потужність (для сучасних печей, що працюють у форсованих режимах).

3. За способом з'єднання:

- Електроди з ніпелем (ніпельні): дозволяють нарощувати електродну колону в міру згоряння, забезпечуючи безперервність процесу.

4. За типом печей: для дугових сталеплавильних печей (ДСП) та для

рудовідновлювальних печей (РПЗ).

Критерії вибору: Діаметр електрода (залежно від ємності печі та сили струму) та рівень потужності (UHP/HP/RP) визначаються технологічним режимом плавки.



Рисунок 1.1 – Графітові електроди RP/IP/HP/UHP для дугової печі




Рисунок 1.2 – Графітові електроди ф75 – ф350 мм




Рисунок 1.3 – Вугільні електроди СК-18

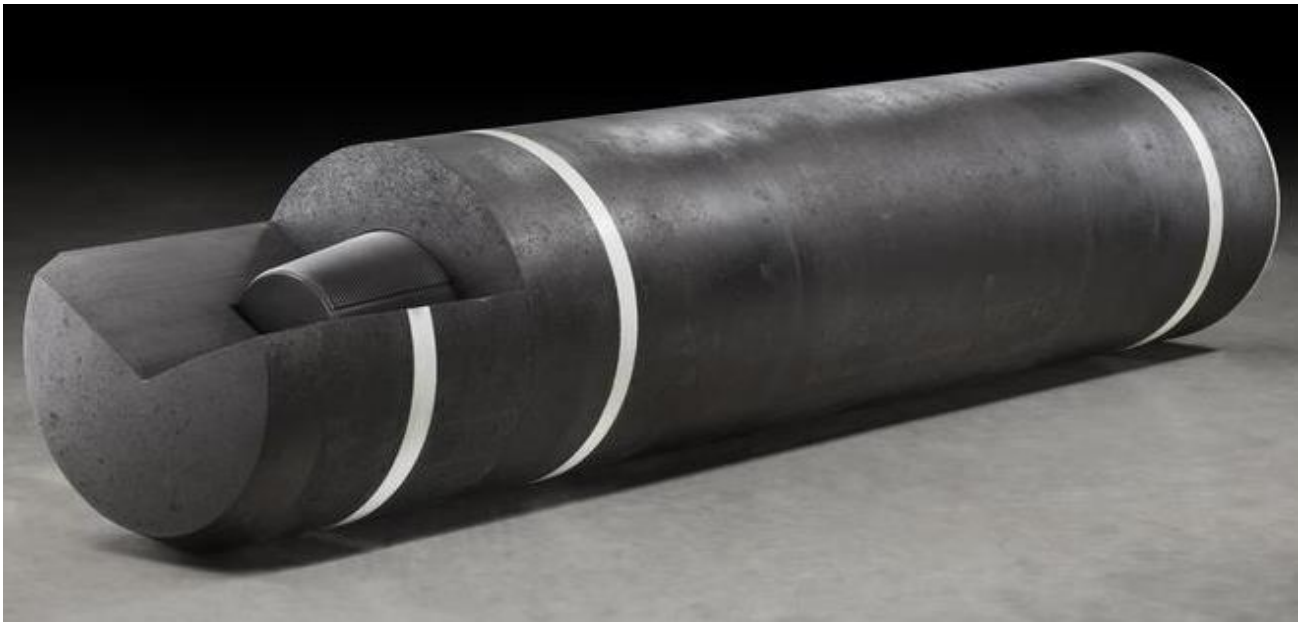


Рисунок 1.4 – Самообпалювальний електрод

Деякі електроди мають антиокислювальне покриття, яке знижує витрати графіту на 19–50% шляхом захисту бічної поверхні від окислення киснем повітря.

### 1.1.2 Класифікація зварювальних електродів

Класифікація зварювальних електродів для ручного дугового зварювання здійснюється за кількома ключовими ознаками:

1. За призначенням (типом металу):

- У: для зварювання вуглецевих і низьколегованих конструкційних сталей.
- Л: для легованих конструкційних сталей.
- Т : для легованих теплостійких сталей.
- В: для високолегованих сталей з особливими властивостями (наприклад, нержавіючі).
- Н: для наплавлення поверхневих шарів.

2. За типом покриття (обмазки):

Тип покриття визначає стабільність дуги та механічні властивості шва:

- А – кисле: забезпечує легке відділення шлаку, але має підвищену токсичність.
- Б – основне: (наприклад, УОНИ 13/55). Містить фтористий кальцій і карбонати. Забезпечує високу пластичність та ударну в'язкість шва, низький вміст водню.
- Р – рутилове: (наприклад, АНО-4, МР-3). Найпопулярніші в побуті, легко запалюються, мало розбризкуються та мають низьку токсичність.
- Ц – целюлозне: (наприклад, ЛБ-52). Містить велику кількість органіки, створює потужний захисний газовий потік. Зручне для зварювання у будь-яких положеннях, зокрема «зверху вниз».
- П – змішане: (наприклад, рутилово-основне РБ).

3. За положенням у просторі

У маркуванні позначається цифрою (від 1 до 4 за системою AWS):

1. Для всіх положень.
2. Для всіх положень, крім вертикального «зверху вниз».
3. Для нижнього, горизонтального на вертикальній площині та вертикального «знизу вгору».
4. Для нижнього та нижнього у човник.

4. Інші критерії:

- За товщиною покриття:

Основні діаметри електродів та їх застосування:

– 1,6–2,0 мм: для тонких металів (0,5–1,5 мм, часто TIG/напівавтомат);

– 2,0–2,5 мм: для тонких конструкцій (1,5–3 мм), побутових робіт;

– 3,0–3,2 мм: універсальні, для металу 3–6 мм;

– 4,0–5,0 мм: для товстих металів (6–12 мм і більше), промислового використання;

– 6,0 мм: для товстих деталей, вимагають високої кваліфікації зварювальника;

- За родом струму: для постійного, змінного або обох типів струму.
- За механічними властивостями: типи на кшталт Е42, Е46, Е50 вказують на тимчасовий опір розриву (в кгс/мм²).

## 1.2 Електроди для електропечей

### 1.2.1 Основні характеристики електродів електропечей

Електрод дугової сталеплавильної печі – це масивний провідник (найчастіше графітовий (рис. 1.1 та рис. 1.2) або вугільний (рис. 1.3)), призначений для підведення електричного струму в зону плавки та створення електричної дуги. Електроди забезпечують високу температуру для розплавлення металобрухту, перетворюючи електричну енергію на теплову, і використовуються переважно в електросталеплавильному виробництві.

Наприклад, вугільні електроди СК-18 виготовлені із аморфного електротехнічного вугілля у вигляді стрижнів круглого перерізу діаметром 18 мм і завдовжки 250 мм з гладкою чорною поверхнею. Вони призначені для різних зварювальних та обробних робіт, включаючи повітряно-дугове різання металів, зварювання металів, зрізання заклепок, видалення дефектів лиття, стружки електроприхваток і зварних швів при силі струму до 1000 А.

Вугільні електроди марки СК-18 також використовуються в зварювальних апаратах, і вони підходять для зварювання кольорових металів, а також для наплавлення твердих сплавів. Завдяки своїй здатності витримувати високі температури, електроди СК-18 застосовуються для перемішування легкоплавких металів у тигелі, а також у лабораторних дослідженнях.

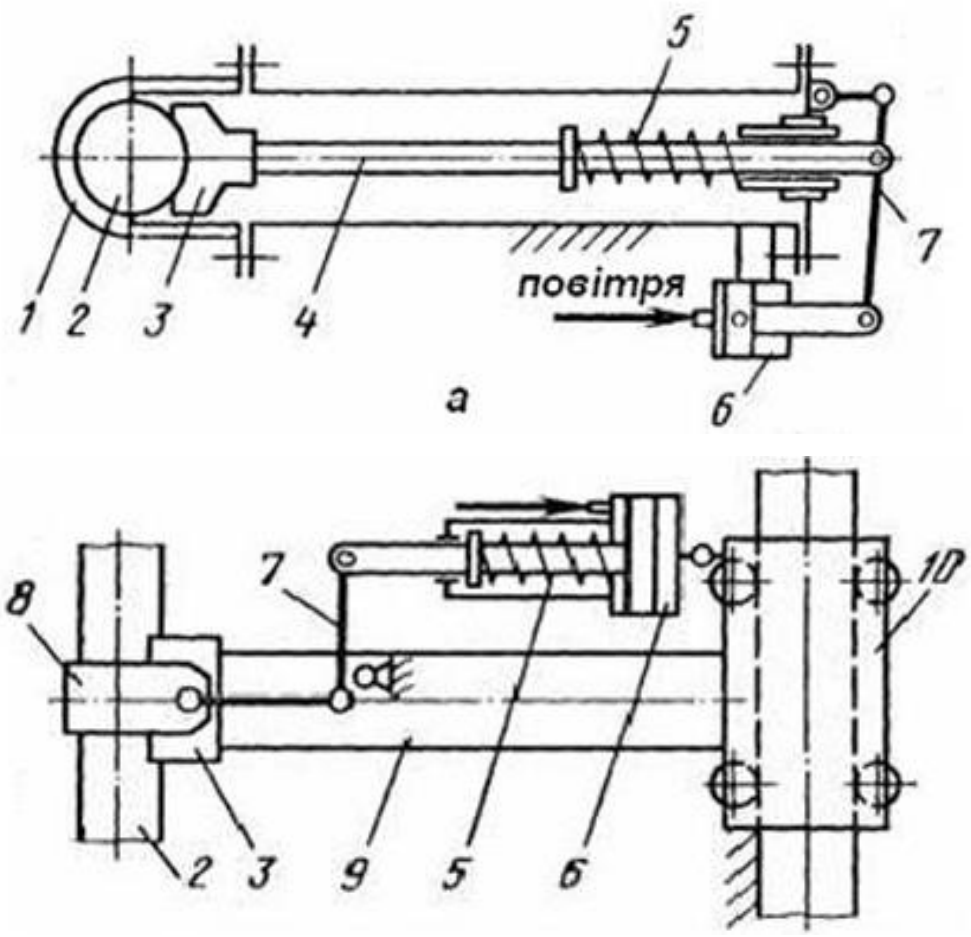
Самообпалювальні або самоспікливі електроди (рис. 1.4) – це безперервні вуглецеві електроди, що формуються та спікаються безпосередньо в руднотермічних печах під час роботи за рахунок тепла печі. Вони складаються з металевого кожуха, що заповнюється електродною масою, яка занурюється у тверду шихту та забезпечує безперервний процес феросплавного виробництва.

Електродотримач (рис. 1.5) дугової сталеплавильної печі – це конструктивний елемент (вузол), призначений для надійної фіксації графітового електрода, подачі до нього електричного струму високої потужності, а також регулювання його положення (підйом/опускання) у робочому просторі печі (рис. 1.6 та рис. 1.7).

Електрод руднотермічних печей суттєво відрізняється від електрода дугових сталеплавильних печей за конструкцією, режимом роботи та призначенням (таблиця 1.1).

У руднотермічній печі електрод працює при інтенсивному тепловиділенні всередині шихти, а в ДСП – зазнає сильного випромінювання дуги та окислення.

Електрод руднотермічної печі зазвичай самоспікливий і працює зануреним у шихту. Електрод дугової сталеплавильної печі – це готовий графітовий електрод, який створює відкриту електричну дугу.




б

а – з рухливою натискною колодкою й нерухомим хомутом; б – з нерухомою натискною колодкою й рухливим хомутом;

1 – півкільце; 2 – електрод; 3 – колодка; 4 – шток; 5 – пружина; 6 – пневмоциліндр; 7 – система важелів; 8 – хомут; 9 – рукав електродотримача; 10 – каретка

Рисунок 1.5 – Схема електродотримача

Електродотримач в руднотермічних печах (рис 1.8) служить для:

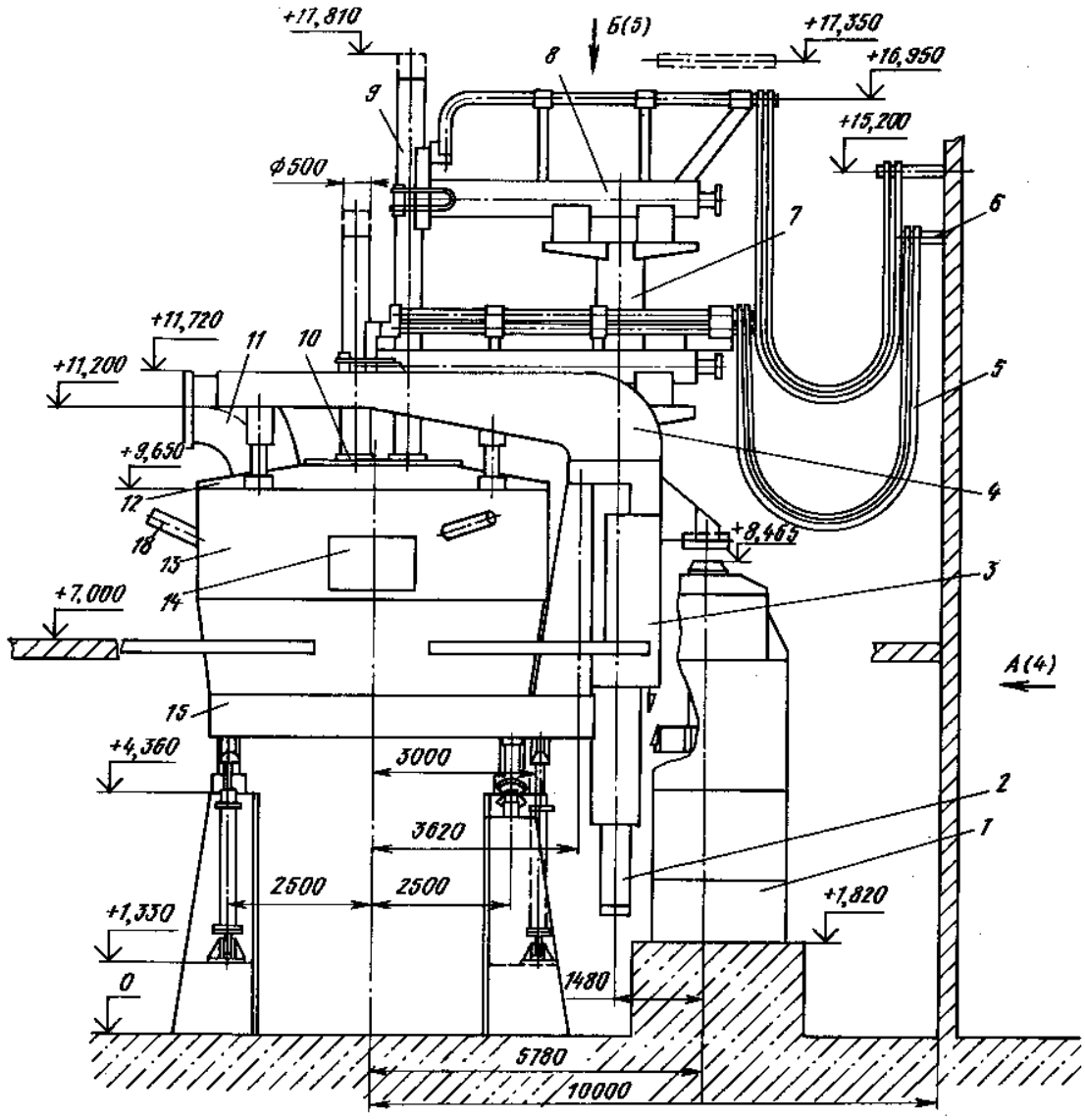
1. Надійного закріплення електрода – утримує електрод (графітовий або самоспікливий) у вертикальному положенні.

2. Підведення електричного струму – передає великий струм від трансформатора до електрода.

3. Регулювання положення електрода – забезпечує його піднімання й опускання для підтримання стабільного електричного режиму плавки.

4. Охолодження контактної зони – зазвичай має водяне охолодження для запобігання перегріву.

5. Компенсації теплових деформацій – дозволяє працювати в умовах високих температур і механічних навантажень.




1 – привод поворотний; 2 – підвіска порталу; 3 – портал; 4 – консоль; 5 – установка кабельних гірлянд; 6 – місце закріплення кабелів; 7 – стійка; 8 – електродотримач; 9 – електрод; 10- ущільнення електродного отвору; 11 – газовідсос; 12 – склепіння; 13 – кожух; 14 – робоче вікно; 15 – похила платформа

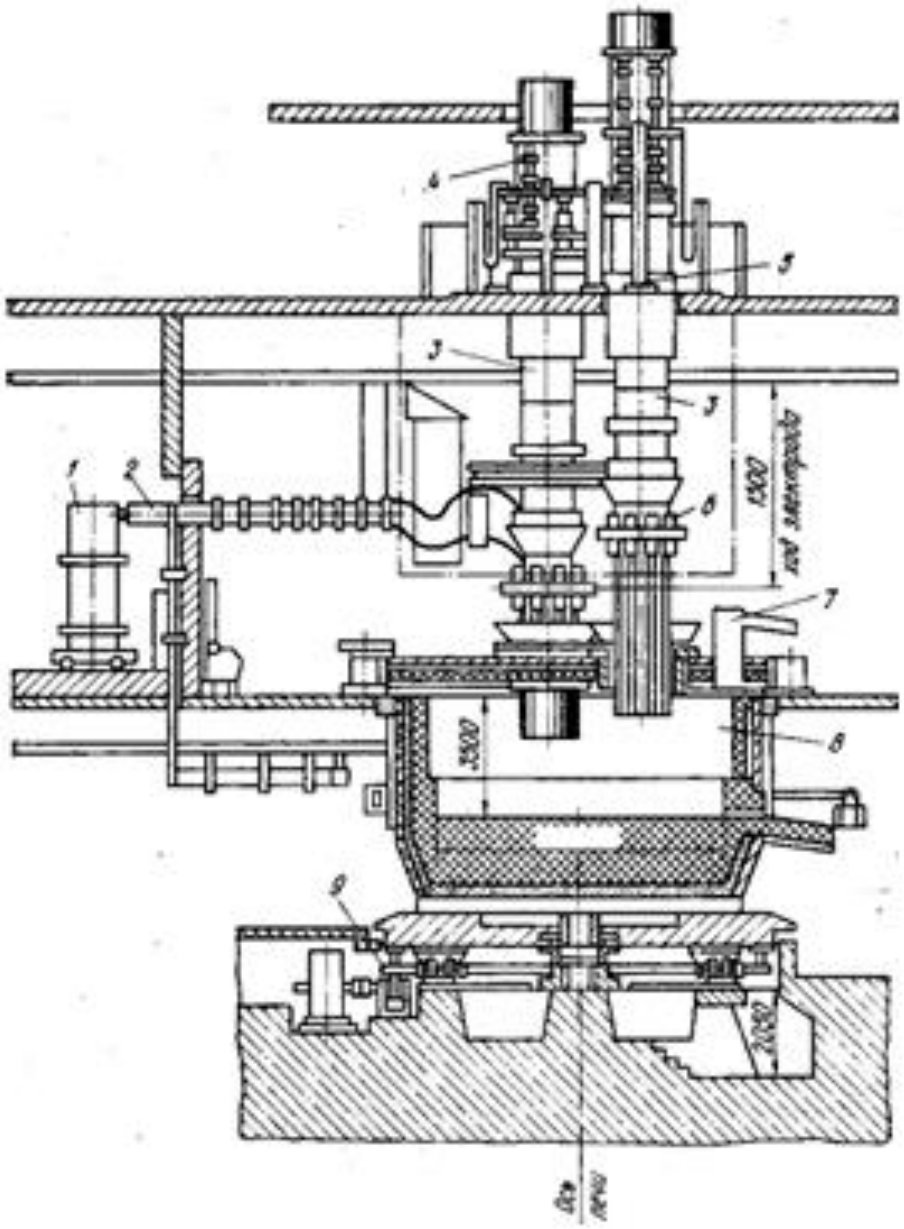
Рисунок 1.6 – Схема дугової сталеплавильної печі



Рисунок 1.7– Електроди в процесі роботи дугової сталеплавильної печі

Таблиця 1.1 – Порівняння характеристик електродів руднотермічних печей та ДСП

| Характеристики електродів | Руднотермічна піч | ДСП |
|---|---|---|
| Тип електрода | Самоспікливий (графітований) | Переважно графітований |
| Конструкція | Порожнистий кожух із електродною масою, що спікається під дією тепла | Готові суцільні графітові секції |
| Діаметр | Дуже великий (до 1,5–2 м) | Менший (зазвичай 300–700 мм) |
| Робочий режим | Занурений у шихту | Працює у відкритій дузі |
| Струм | Дуже великі струми (десятки–сотні кА) | Менші порівняно |



1 – трансформатор; 2 – коротка мережа; 3 – електроди; 4 – механізм перепуску електродів; 5 – механізм переміщення електродів; 6 – електроконтактний вузол; 7 – газовідвід; 8 – ванна печі; 9 – механізм обертання ванни

Рисунок 1.8 – Схема руднотермічної печі

### 1.2.2 Технологія виробництва графітових електродів

Основними етапами виробництва графітових електродів є:

1. Підготовка сировини: використання нафтового коксу (рис. 1.9) як

наповнювача та кам’яновугільного пеку (рис. 1.10) як сполучного матеріалу.

2. Змішування і формування: кокс і пек змішують при високій температурі, потім формують отриману масу (зазвичай шляхом пресування або екструзії).

3. Випал: заготовки обпалюються в печах при температурах вище 900 $^0$C для видалення летких речовин і створення вуглецевої структури.

3. Графітація (рис. 1.11): спеціальна термічна обробка при температурах, що перевищують 2000 $^0$C для перетворення аморфного вуглецю на графіт.

4. Механічна обробка: прецизійна обробка електродів, свердління отворів для штифтових з'єднань.



Рисунок 1.9 – Нафтовий кокс



Рисунок 1.10 – Кам’яновугільний пек




Рисунок 1.11 – Процес графітизації електродів

Застереження при роботі з електродами:

1. Слід висушити графітовий електрод (рис. 1.12) поруч з дуговою сталеплавильною піччю перед її використанням, при цьому температура повинна бути не більше 150 $^0$C, а час – не менше 24 годин.



Рисунок 1.12 – Процес сушіння графітових електродів

2. Треба слідкувати за з'єднанням електродів (рис. 1.13).

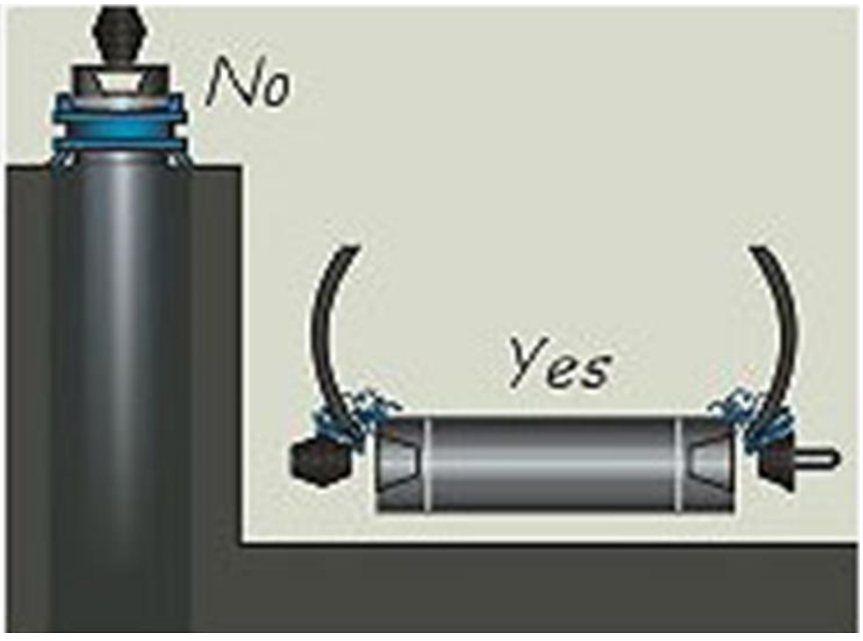



Рисунок 1.13 – Процес з'єднання графітових електродів

Слід провести очищення різьби електрода; потім обережно вкрутити конектор в один кінець електрода, а конектор підйомника – в інший кінець електрода. Слід бути обережними, щоб не пошкодити різьбу. Не рекомендується вкручувати безпосередньо в електроди, які використовуються для кріплення ніпелів на плиті.

3. Не можна чистити різьблення електродів сталевою ватою, металевими щітками або абразивними тканинами. Слід використовувати стиснене повітря, що не містить масла і води (рис. 1.14).

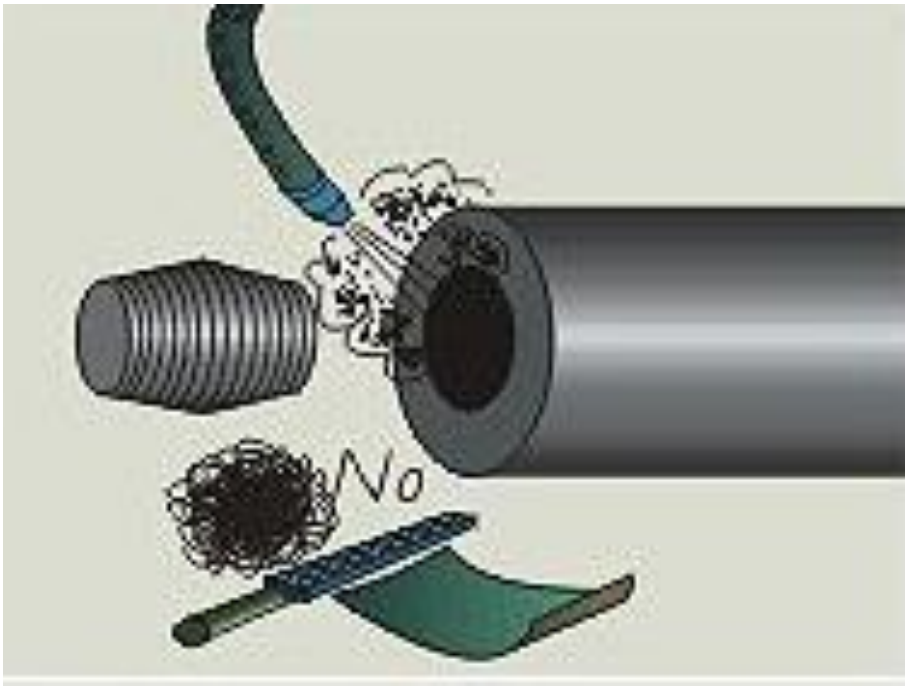



Рисунок 1.14 – Процес чищення графітових електродів

4. Треба використовувати поворотний еластичний гачок. Також слід підкладати під графітовий електрод м'яку підкладку сосок щоб запобігти пошкодженню ниток (рис. 1.15).

5. Необхідно використовувати еластичний гачок, щоб повісити електрод на піч. Спочатку треба знайти центр, потім повільно рухайтеся вниз і акуратно закрутити. Нарешті, слід затягнути його залізним обручем (рис. 1.16).

6. Слід використовувати спеціальні штангенциркулі для затягування відповідно до вказаного моменту. Також можна затягнути із зазначеним

моментом затягування за допомогою механічних засобів або гідравлічного чи пневматичного обладнання (рис. 1.17).

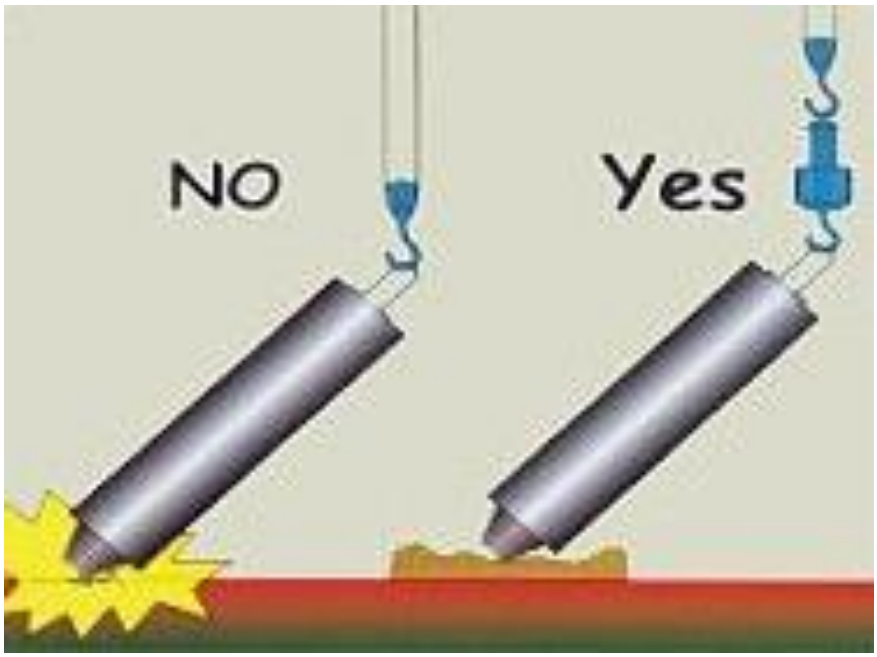



Рисунок 1.15 – Процес чищення графітових електродів

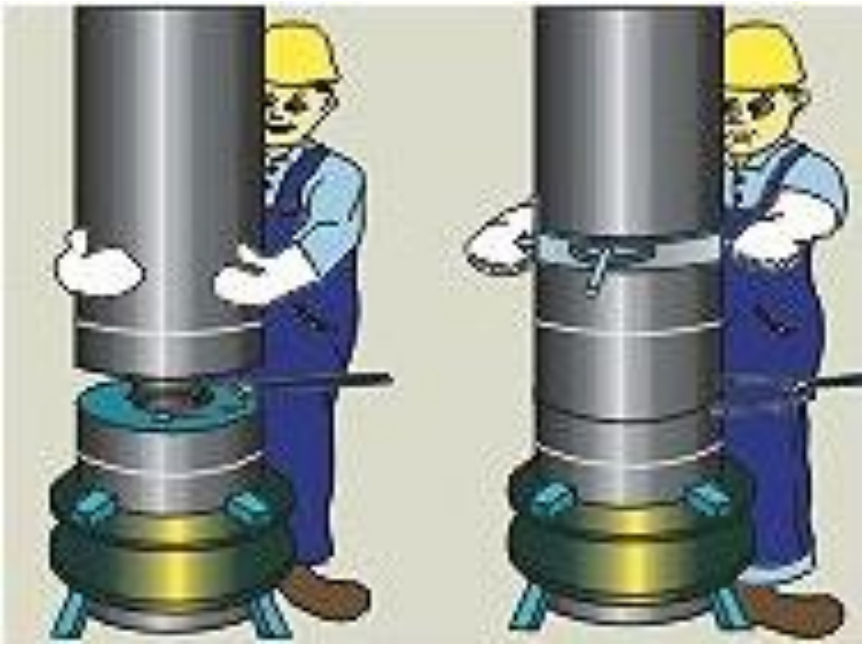


Рисунок 1.16 – Як треба повісити графітовий електрод на піч

7. Слід переконатися, що затискачі електродів знаходяться в межах двох білих попереджувальних ліній. Необхідно часто очищати контактну поверхню фіксатора та електрода, оскільки вона підтримує хороший контакт з

електродом. Слід також переконатися, що водяна сорочка охолодження стійки інструмента не протікає (рис. 1.18).

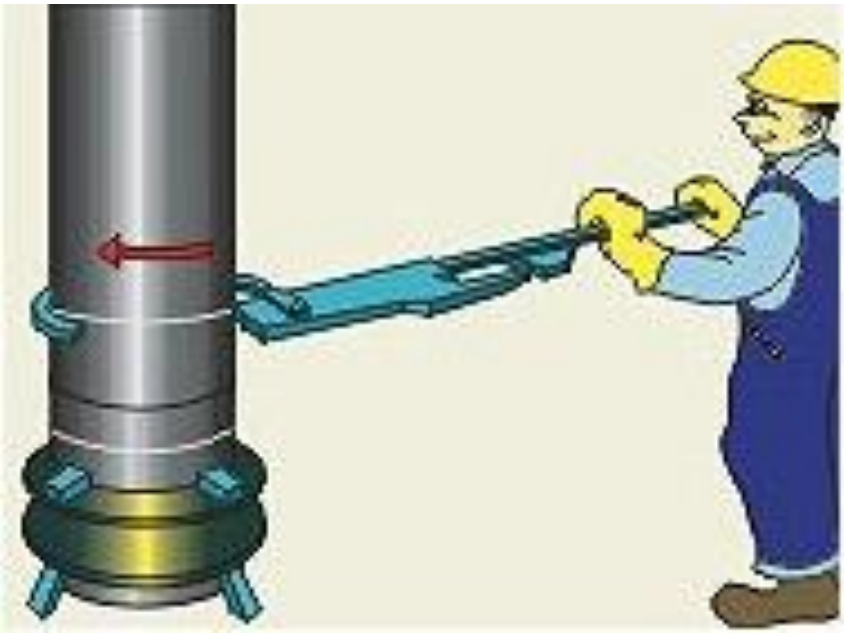


Рисунок 1.17 – Як треба  затягувати графітовий електрод на піч

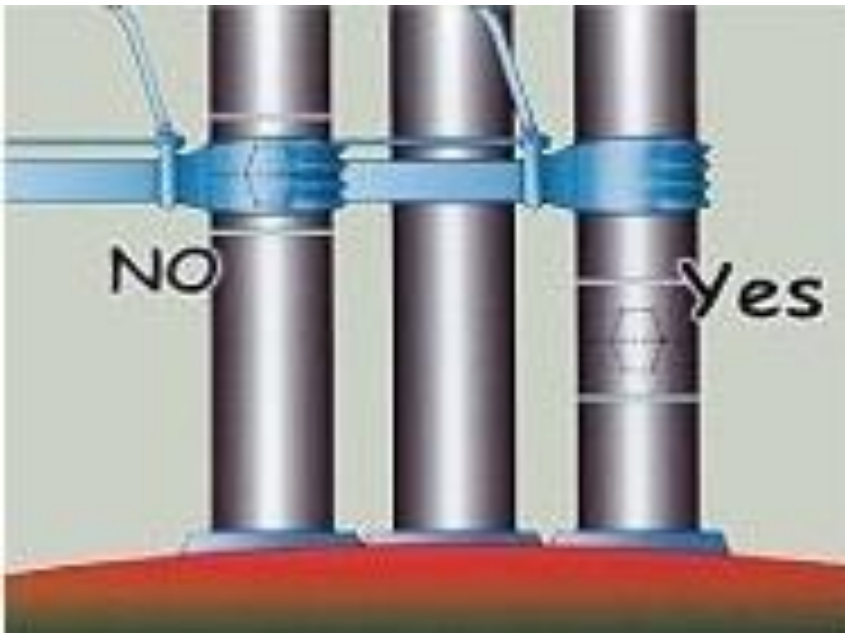



Рисунок 1.18 – Затискачі електродів знаходяться в межах двох білих попереджувальних ліній

8. Не слід класти в піч ізоляційні матеріали, щоб не зламати електроди. У

той же час треба переконатися, що робочий струм електрода відповідає допустимому струму електрода, зазначеному в інструкції (рис. 1.19).

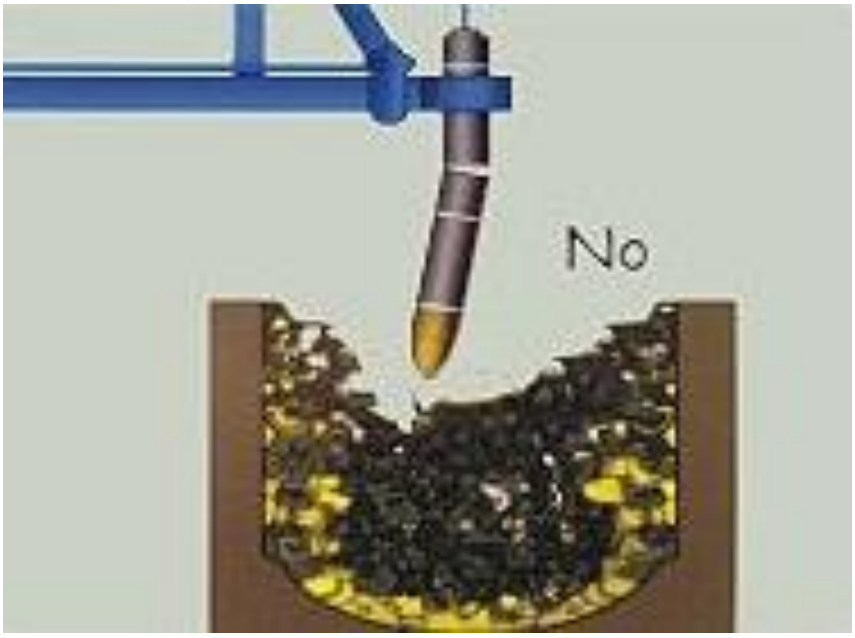



Рисунок 1.19 – Затискачі електродів знаходяться в межах двох білих попереджувальних ліній

### 1.3 Електроди для зварювання

Електроди для зварювання (рис. 1.20) – це металеві або неметалеві стрижні з електропровідних матеріалів, призначені для підведення струму до зони зварювання, формування дуги та заповнення зварювального шва.

Розрізняють чотири типи покриттів електродів: основний, рутиловий, кислий та целюлозний. Основне та рутилове покриття використовується для зварювання на постійному струмі. Дані види покриттів використовують при зварюванні особливо відповідальних конструкцій, де потрібна максимальна якість зварного з'єднання.

Рутилові електроди підійдуть для зварювання на постійному або змінному струмі. Вони відрізняються легким підпалом та малою кількістю розбризкування металу. При використанні електродів з кислим покриттям можна домогтися легкого відділення шлаку, проте користуватися такими

електродами в замкнутому просторі – не рекомендується.

Найбільш поширені електроди з основним (УОНІ 13/55) та рутиловим (МР-3, АНО-36, АНО-21, АНО-4) покриттями для зварювання нержавіючої сталі.








Рисунок 1.20 – Електроди для зварювання

Основні типи електродів для зварювання:

1. Електроди зі шкідливим покривом.

2. Електроди зі шкідливими речовинами.

3. Електроди з особливо високою стійкістю до зношування.

4. Електроди з низьким розрідженням.

При виборі електрода для зварювання важливо враховувати не лише тип матеріалу, який буде зварюватися, але й умови роботи, наявність необхідного обладнання та особливості самого процесу. Деякі електроди можуть мати покриття, яке допомагає уникнути окислення металу під час зварювання, забезпечуючи чисте та міцне з'єднання.

Кожен з типів електродів має свої особливості і властивості, які варто враховувати при виборі. Електроди зі шкідливим покривом, наприклад, мають високий рівень викидів шкідливих речовин, що може впливати на здоров'я зварювальника. Електроди з низьким розрідженням, з іншого боку, дозволяють отримати більш якісне з'єднання.

При виборі електрода для роботи з конкретним матеріалом важливо враховувати його хімічний склад, твердість та товщину. Наприклад, для зварювання сталі з високим вмістом вуглецю можуть підійти електроди з особливою стійкістю до утворення тріщин. Крім того, важливо враховувати температурні умови роботи, оскільки деякі електроди можуть втрачати ефективність при високих температурах.

При виборі електрода, вам слід враховувати такі фактори, як тип металу, який ви збираєтесь зварювати, його товщину, положення зварювання та його вимоги до міцності. Також варто враховувати ваш рівень досвіду як зварювальника.

Найпоширенішими електродами з основним покриттям є електроди УОНИ 13/55. Дані електроди призначені для вуглецевих та низьколегованих сталей. Для зварювання особливо відповідальних конструкцій, відрізняються пластичністю та стійкістю до ударних навантажень. Вироби, зварені УОНІ 13/55, можуть експлуатуватися в умовах низьких температур. До

недоліків цих електродів слід віднести підвищену вимогу до чистоти кромок заготовок. Якщо кромки заготовок перед зварюванням не обробити і на них потрапить олія, вода або іржа, велика ймовірність появи зварювальних пір. УОНИ 13/55 призначені для зварювання постійним струмом зворотної полярності.

Поширеним представником рутилових електродів є електроди МР-3. Вони призначені для роботи з вуглецевими та низьколегованими сталями. Сильними сторонами даних електродів є зварювання як у постійному і змінному струмах, мале розбризкування металу, стабільність дуги переважають у всіх просторових положеннях.

Кожен тип електрода має свої особливості та принципи використання. Декотрі електроди можуть потребувати певного нахилу або швидкості руху, щоб запобігти виникненню дефектів. Важливо докладно вивчити характеристики вибраного електрода та дотримуватися рекомендацій виробника для досягнення найкращих результатів.

При використанні різних типів електродів також слід враховувати їхню специфіку щодо взаємодії з матеріалом, який ви зварюєте. Наприклад, деякі електроди можуть бути більш підходящими для зварювання тонкостінних металів, тоді як інші можуть надавати кращий результат при роботі з товстими деталями. Важливо ретельно підібрати електрод відповідно до конкретного завдання, щоб забезпечити якісний та міцний зварний шов.

Незалежно від вибраного електрода, деякі загальні рекомендації з техніки зварювання залишаються актуальними. Наприклад, стежте за постійністю шву, використовуйте правильну силу струму, дотримуйтесь потрібної швидкості руху та не перегрівайте матеріал.

### 1.4 Застосування графітованих ґнотових електродів на ДСП постійного струму

Графітовані ґнотові електроди застосовуються в електротермічних

установках, зокрема:

- у руднотермічних печах для виробництва феросплавів, кремнію, карбіду кальцію;
- у деяких типах електродугових печей;
- для підведення струму великої сили до зони плавлення;
- у процесах, де потрібна висока електропровідність і термостійкість.

Ґнотові електроди використовують переважно як струмопідвідні елементи або спеціальні вставки у великих електродних системах.

Основні властивості графітованих ґнотових електродів, що застосовуються в електротермічних печах:

1. Висока електропровідність (забезпечує передачу струмів великої сили з мінімальними втратами).

2. Термостійкість (витримують температури понад 2500–3000 °C).

3. Малий електрична питомий опір (5–10 мкОм·м).

4. Стійкість до термічних ударів (добре переносять різкі зміни температури).

5. Хімічна інертність (стійкі до впливу шлаків та більшості агресивних середовищ (крім окисного при високих температурах)).

Особливості конструкції ґнотових електродів – виготовляються з нафтового або пекового коксу; після формування проходять графітизацію при температурі близько 2800–3000 °C; мають пористу структуру, що забезпечує стійкість до термонапружень.

Ефективним засобом покращення техніко-економічних показників ДСП постійного струму є застосування ґнотових графітованих електродів (рис. 1.21 та рис. 1.22), розроблених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

Ґнотові електроди мають у своєму складі компоненти з низькою роботою виходу електронів, що створює сприятливі термодинамічні умови для іонізації газів стовпа дуги в прикатодній області.

Електрична дуга ґнотового електрода завжди стійко тримається на ґноті та не мігрує по торцю електрода, характеризується високою стабільністю при

великій довжині та на низьких напругах джерела живлення.



Рисунок 1.21 – Фрагмент роботи печі ДСВ-50 з ґнотовими електродами діаметром 508 мм

Відповідно до особливостей і параметрів дуги ґнотових електродів при переплаві відходів FeSiMn на промисловій ДСП постійного струму забезпечуються: стабільний електричний режим; економія активної електроенергії до 8,35 % під час роботи на подовжених дугах; зниження реактивної потужності до 23 %; підвищення cos φ з 0,48 до 0,74; збільшення продуктивності печі на 7,5 %; скорочення розкиду часу плавок у 2,0–2,5 рази.

При переплаві каталізатора та його похідних (зливки, ванадійвмісний

шлак, виплавка феровanадію) ґнотові електроди залежно від їх складу забезпечують: збільшення продуктивності печі до 25,6 %; зниження чаду Ni та Mo при переплаві та рафінуванні зливків на 10,3 %; зниження чаду ванадію на 17,4 % при виплавці феровanадію; зниження витрати електроенергії на 30 %.

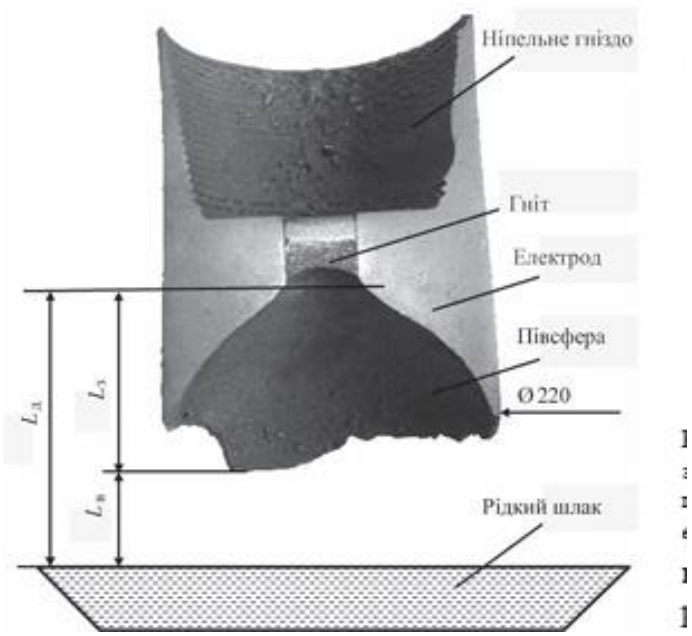



Рисунок 1.22 – Макротемплет ґнотового електрода з вихідним діаметром 350 мм і складові довжини дуги ґнотового електрода (Lд , Lз , Lв )

# 2 ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ЕЛЕКТРОДІВ, РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЇХ ВИБОРУ

Процеси, які визначають витрату електродів (таблиця 2.1), поділяють на безперервні (окислення, сублімація й ерозія) та періодичні (обламування робочої частини, а також відколи через теплові удари). Для зниження безперервної витрати електродів застосовують захисні покриття металізацією або іншими методами, а також роботу ДСП на довгих дугах з відповідним зниженням сили струму (зниження витрати графіту на робочій ділянці електроду), а також поєднання довгої дуги з пінистим шлаком (перешкода ерозії графіту бризками рідкого металу та стабільніше горіння дуги). На окислення бічної поверхні електродів суттєво впливають газодинамічні процеси, склад газової фази в об’ємі ДСП, а також ефективність роботи ущільнень електродних проміжків і системи відведення газів.

Таблиця 2.1 – Баланс витрати графітових електродів у ДСП

| Статті витрати графітових електродів | Од. виміру | |
|---|---|---|
| | кг/т | % |
| Окислення бічної поверхні за дії температури | 1,5645 | 37,7 |
| Термомеханічне руйнування та знос | 1,4608 | 35,2 |
| Емісія за дією електричного поля | 0,4107 | 9,9 |
| Окислення торцевих частин | 0,2782 | 6,7 |
| Поломка від згинальних навантажень | 0,1868 | 4,5 |
| Руйнування графіту рідким металом | 0,1204 | 2,9 |
| Дія ударних і згинальних навантажень | 0,1289 | 3,1 |
| Повна витрата електроду | 4,1500 | 100 |

Якість поверхні графітового електрода повинна відповідати наступним вимогам:

1. Графітові електроди повинні мати гладку поверхню з максимум двома

шматками або порожнечами і не мати поперечних тріщин. Якщо є поздовжні тріщини, вони повинні бути не ширше 0,3–1,0 мм, а їх сумарна довжина не повинна перевищувати 5% окружності електрода, з обмеженням до двох тріщин.

2. Щодо більш ніж двох частин або пустот. Виробник графітових електродів гарантує, що ширина буде менше однієї десятої окружності електрода. А довжина – менше однієї третини довжини електрода.

3. Ніпель, отвір ніпеля та поверхня електрода в межах 100 мм від дна отвору не повинні мати пустот і тріщин.

4. На різьбі ніпеля та отвору для ніпеля не повинно бути більше одного відсутнього блоку. А довжина не повинна бути більше 30 мм.

Кожен графітовий електрод повинен ретельно тестуватися на продуктивність перед тим, як покидати завод-виробник. Проводять оцінку ключових його властивостей, таких як провідність, питомий опір і точність розмірів (рис. 2.1).

Основні вимоги, що висуваються до всіх типів електродів, наступні:

– забезпечення стійкого горіння дуги;

– одержання металу шва визначеного хімічного складу і заданих властивостей, без дефектів;

– достатня міцність покриття;

– спокійне та рівномірне плавлення стрижня і покриття в процесі зварювання;

– хороше формування шва;

– мінімальні втрати електродного металу на вигоряння та розбризкування;

– висока продуктивність процесу зварювання;

– легке відокремлення шлакової кірки;

– достатня міцність покриття;

– тривале зберігання без погіршення фізико-хімічних і зварювально-технологічних властивостей електродів;

– мінімальна токсичність у процесі виготовлення та зварювання.

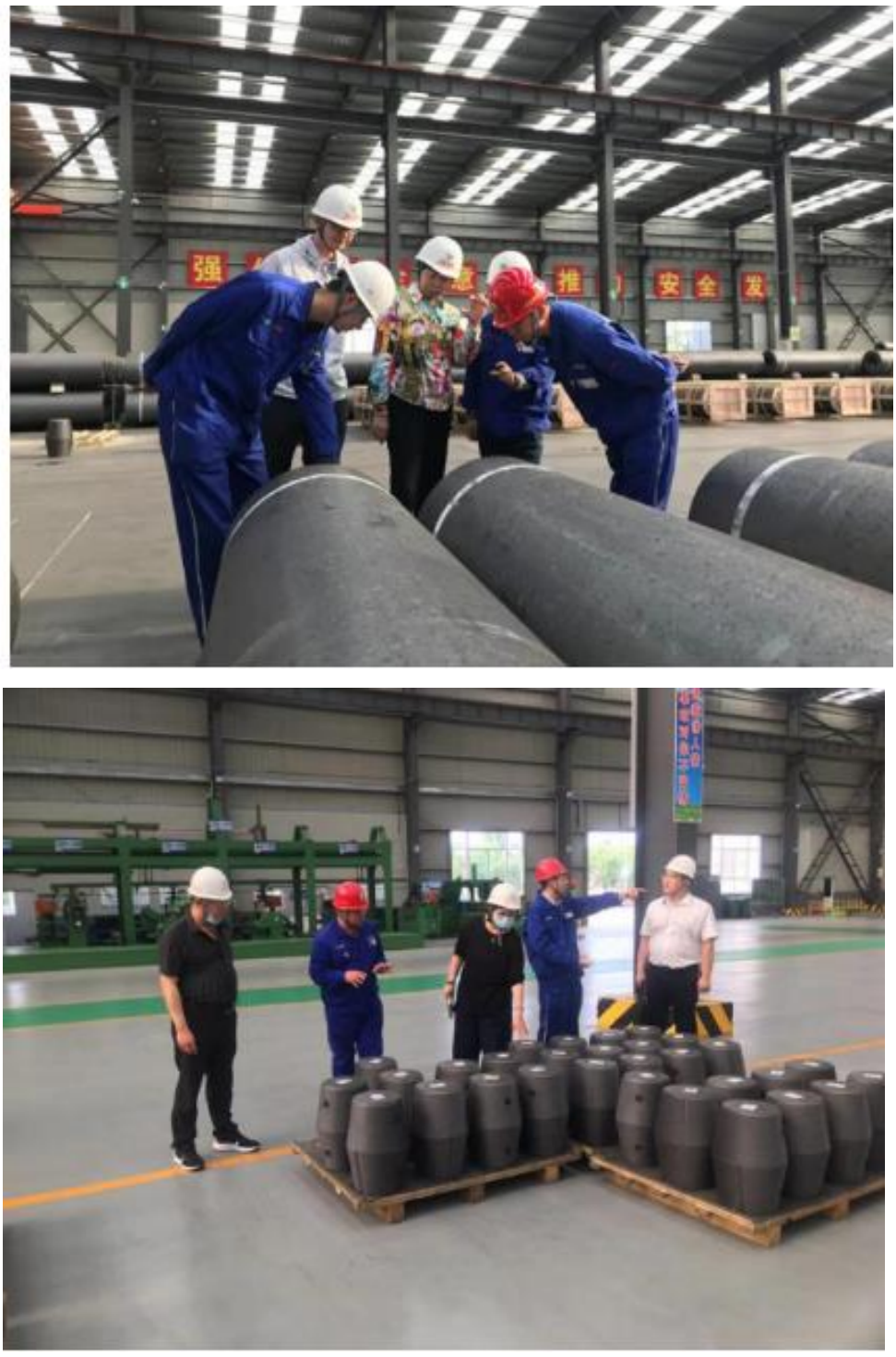


Рисунок 2.1 – Контроль якості електродів на підприємстві

Спеціальні вимоги, що висуваються до покритих електродів, наступні:

– одержання заданої форми шва (глибоке проплавлення, увігнутий меніск, зварювання в різних просторових положеннях тощо);

– можливість зварювання певним способом (зварювання з опиранням, зверху вниз тощо);

– одержання металу шва зі спеціальними властивостями (підвищеною міцністю, твердістю, пластичністю, жаростійкістю, зносостійкістю тощо) та інші.

Для задоволення перелічених вимог у покриття електродів вводять певні речовини: шлакоутворювальні, газоутворювальні, розкиснювачі, легувальні, стабілізувальні, пластифікатори та зв’язувальні. Металеві стрижні мають різний хімічний склад, але зазвичай близький до складу зварюваного металу.

Шлакоутворювальні речовини становлять основну частину більшості марок покриттів. До них належать: кварцовий пісок, польовий шпат, каолін, слюда мусковіт, ільменітовий і рутиловий концентрати, мармур, плавиковий шпат, магнезит, гематит та ін. Перелічені компоненти покриттів під час плавлення утворюють шлак, який захищає як краплі розплавленого електродного металу, так і зварювальну ванну від контакту з навколишньою атмосферою.

Газоутворювальні компоненти вводять у покриття електродів у вигляді органічних речовин (електродна целюлоза, деревне борошно, крохмаль ті анші) або у вигляді карбонатів (мармур, доломіт, магнезит, вапняк тощо). Можлива комбінація вуглецевмісних компонентів (графіт, деревне вугілля, сажа) й окисника, наприклад гематиту. Органічні складові покриття та карбонати під час нагрівання розкладаються й утворюють гази, які відтісняють навколишню атмосферу від дугового проміжку.

Для одержання високої якості шва розплавлений метал необхідно розкиснювати, тобто відновлювати оксиди, що містяться в розплаві. З цією метою в покриття вводять розкиснювачі у вигляді феросплавів (феромарганець, феросиліцій, феротитан тощо) або у вигляді металів (алюміній, цирконій, марганець тощо). Як розкиснювач може виступати, наприклад, графіт. Якщо електроди мають стрижень з легованої сталі, то розкиснення частково здійснюється легувальними елементами стрижня.

Легувати метал шва можна за допомогою легувальних елементів стрижня або покриття (у вигляді феросплавів на основі марганцю, хрому, нікелю, молібдену, кремнію). На практиці застосовують обидва способи легування, але найбільш стабільний хімічний склад, механічні властивості та інші характеристики забезпечуються при легуванні металу шва через стрижень електрода.

Для стабілізації горіння електричної дуги в покриття вводять сполуки лужних і лужноземельних металів (калій, натрій, цезій, кальцій), які мають низький потенціал іонізації та малу роботу виходу електронів. Компоненти покриття, що стабілізують горіння дуги: силікати натрію і калію, поташ, слюда мусковіт, польовий шпат, мармур, вуглекислий барій, кальцинована сода тощо.

Для підвищення пластичності обмазувальної маси в процесі опресування покриття до його складу вводять пластифікатори: карбоксиметилцелюлозу, каолін, тальк, слюду мусковіт, поташ, кальциновану соду, целюлозу, бентоніт тощо. Як зв’язувальні речовини під час виготовлення покритих електродів найчастіше використовують натрієве, калієве, натрієво-калієве та калієво-натрієве рідке скло. У покриттях деяких електродів для зв’язування застосовують різні лаки та порошкоподібні пластмаси.

Більшість складових покриття одночасно виконує кілька функцій, тому прийнятий їх поділ за призначенням є умовним. Наприклад, мармур, магнезит і доломіт є одночасно шлакоутворювальними та газоутворювальними компонентами; слюда мусковіт, польовий шпат, рідке скло – шлакоутворювальними, стабілізувальними, пластифікувальними та зв’язувальними; феросплави й метали – розкиснювачами та легувальними.

У найменуванні більшості матеріалів зазначено їх призначення для електродного виробництва, що пов’язано з необхідністю використання лише хімічних елементів і матеріалів, чистих від шкідливих для металу зварних швів домішок. Склад покриття вибирають залежно від призначення електродів і необхідних властивостей металу шва.

Зокрема, комбінація шлакоутворювальних і газоутворювальних

компонентів також залежить від призначення електрода. Наприклад, для високолегованих зварювальних електродів зазвичай використовують шлакову систему флюоритно-карбонатного типу на такій основі: мармур ($CaCO_3$) + флюорит ($CaF_2$) + рутил ($TiO_2$). Для низьковуглецевих і низьколегованих електродів застосовують шлакові системи на основі: мармур ($CaCO_3$) + флюорит ($CaF_2$) + кремнезем ($SiO_2$); рутил ($TiO_2$) + мармур ($CaCO_3$) + алюмосилікати ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$); рутил ($TiO_2$) + магнезит ($MgO$) + алюмосилікати ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$) тощо. Співвідношення цих компонентів визначаються технологічними вимогами до електрода та встановлюються експериментально.

Вибір необхідних компонентів реалізований у методиці розрахунку захисно-легувального покриття електродів. Викладена методика передбачає відомий склад металу електрода, при цьому розраховується склад покриття, що складається з легувальної та газо-, шлакоутворювальної частин, а також зовнішній діаметр покриття.

Вихідними даними для розрахунку є склад розплавленого металу і стрижня; тип шлакової системи, заданий, наприклад, співвідношенням мас компонентів у шлакоутворювальній частині покриття; діаметр електродного стрижня; склад компонентів. У методиці розрахунку застосовано термін «розплавлений метал», який, на відміну від терміна «наплавлений метал», не враховує підмішування елементів з основного металу. Він точніше відповідає меті – розрахунку складу електрода.

Оцінювання якості зварних з’єднань у металоконструкціях, трубопроводах, посудинах під тиском, елементах металургійного обладнання та інше проводиться згідно з ДСТУ EN ISO 4136 «Руйнівні випробування зварних з’єднань металевих матеріалів. Випробування на розтяг зразків, вирізаних із зварного з’єднання».

З метою досягнення найкращого результату при використанні електродів, рекомендується звернути увагу на такі фактори:

– Правильно підібрати тип електрода відповідно до робочого матеріалу. Наприклад, для зварювання алюмінію рекомендується використовувати

електроди з покриттям, що містить магній, оскільки це допомагає уникнути появи пор.

– Дотримуватися рекомендацій щодо параметрів зварювання, таких як струм, напруга та швидкість руху електрода. Неправильно встановлені параметри можуть призвести до недостатньої якості зварювального шва або навіть до його руйнування.

– Приділити увагу до якості електродів та їх завода-виробника. Висока якість електродів забезпечує більш стабільні результати зварювання та довговічність зварювального обладнання.

Загалом, вибір правильного електрода є важливим етапом у зварювальному процесі. Врахування критеріїв вибору та дотримання рекомендацій допоможуть досягти оптимального результату та забезпечити якість зварювальних робіт.

# 3 ОГЛЯД СЬОГОДЕННИХ ВИРОБНИКІВ ЕЛЕКТРОДІВ

## 3.1 Графітові електроди ПрАТ «Український графіт»

ПрАТ «Український графіт» є одним з засновників технології виробництва графітових електродів в Європі (рис. 3.1 та рис. 3.2).

Основні характеристики електродів ПрАТ «Укргрaфіт» наступні:

1. Діапазон: діаметри від 75 до 700 мм, що покривають потреби різних типів електропечей.

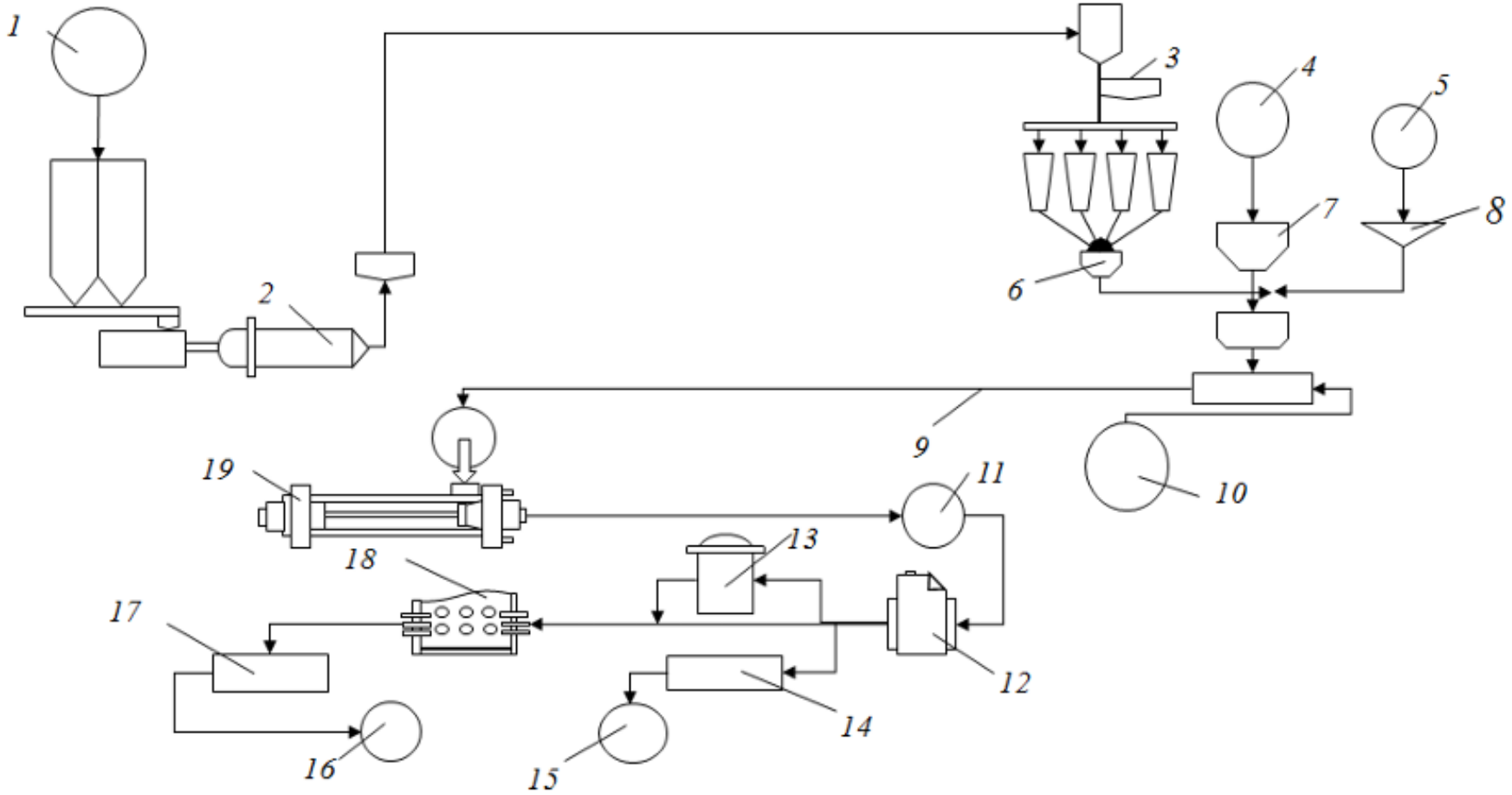
2. Маркування: ЕГ – стандартні графітові електроди, ЕГП – електроди з додатковим просоченням і випалом, ЕГСП – електроди особливої якості (з додатковим просоченням) (рис. 3.3).

3. Застосування: використання в металургійній промисловості для переробки брухту та виробництва сталі.

4. Переваги: висока електропровідність, термостабільність, оптимізація процесів електролізу та плавлення.




Рисунок 3.1 – Графітові електроди ПрАТ «Укргрaфіт»




1 – склад сировини; 2 – дроблення; 3 – розсів; 4 – склад пеку; 5 – склад добавок; 6 – дозування шихти; 7 – дозування пеку; 8 – дозування добавок; 9 – змішування; 10 – товарні маси; 11 – склад «зелених» заготовок; 12 – випал; 13 – насичування; 14 – механічна обробка вугільної продукції; 15 – склад вугільної продукції; 16 – склад графітованої продукції: 17 – механічна обробка графітованої продукції; 18 – графітація; 19 – пресування.

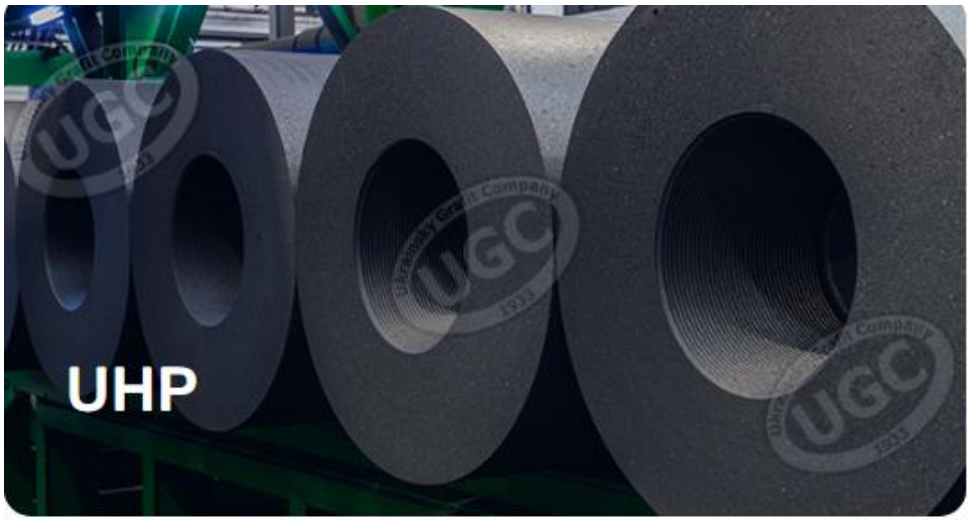
Рисунок 3.2 – Технологічний процес виробництва графітових електродів в умовах ПрАТ «Укрграфіт»




а




б




в

а – рядові графітовані електроди, марка ЕГ; б – електроди графітовані з додатковим просочуванням та випалом ЕГП ; в – електроди графітовані з додатковим просочуванням та випалом на коксі спеціальної якості ЕГСП

Рисунок 3.3 – Різновиди графітових електродів ПрАТ «Укрграфіт»

Фізико-механічні характеристики, стандартні розміри та маса графітових електродів ПрАТ «Укрграфіт», а також рекомендовані зусилля під час нарощування колони приведені в таблицях 3.1– 3.3.

Таблиця 3.1 – Фізико-механічні характеристики графітових електродів ПрАТ «Укрграфіт»

| Технічні характеристики | | 200～350мм | | | 400～700мм | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 8″～14″ | | | 16″～28″ | | |
| | | RP Марка ЕГ | HP Марка ЕГП | UHP Марка ЕГСП | RP Марка ЕГ | HP Марка ЕГП | UHP Марка ЕГСП |
| Уявна щільність | г/см$^3$ | 1,58～1,61 | 1,68～1,72 | 1,68 ～1,73 | 1,59～1,62 | 1,68～1,73 | 1,69～1,74 |
| Питомий електроопір | мкОм*м | 7,5～8,5 | 6,0～7,0 | 6,0～6,5 | 7,5～8,5 | 6,0～7,0 | 5,0～6,0 |
| Модуль пружності | кН/мм$^2$ | 7～9 | 8,5～9,5 | 9,5～10 | 6～7 | 8,5～9 | 9,5～10,5 |
| | ГПа | 7～9 | 8,5～9,5 | 9,5～10 | 6～7 | 8,5～9 | 9,5～10,5 |
| | кгс/мм$^2$ | 700～900 | 870～970 | 970～1020 | 600～700 | 870～900 | 970～1070 |
| Механічна міцність на вигин | Н/см$^2$ | 700～900 | 1200～1500 | 1200～1600 | 800～1000 | 1200～1500 | 1200～1500 |
| | МПа | 7～9 | 12～15 | 12～16 | 8～10 | 12～15 | 12～15 |
| | кгс/см$^2$ | 71～92 | 122～153 | 122～163 | 82～102 | 122～153 | 122～153 |
| Термічний коефіцієнт лінійного розширення (20-520 °С) | ×10-6/°С | 2,5～2,7 | 2,6～2,8 | 1,9～2,2 | 2,5～2,6 | 2,5～2,8 | 1,3～1,4 |
| | ×10-6/°F | 1,39～1,50 | 1,44～1,56 | 1,06～1,22 | 1,39～1,44 | 1,39～1,56 | 0,72～0,78 |
| Дійсна щільність | г/см$^3$ | 2,23～2,25 | 2,23～2,26 | 2,23～2,26 | 2,23～2,25 | 2,23～2,26 | 2,23～2,26 |
| Вміст зольних домішок | % | <0,2 | <0,2 | <0,2 | <0,2 | <0,2 | <0,2 |

Таблиця 3.2 – Стандартні розміри та маса графітових електродів ПрАТ «Укрграфіт»

| Стандарт | | Діаметр | | Довжина | | Типова маса без ніпеля | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Макс | Мін | Макс | Мін | PR Марка ЕГ | HP Марка ЕГП | UHP Марка ЕГСП |
| мм | дюйм | мм | мм | мм | мм | кг | кг | кг |
| 75×1000 | 3×40 | 73 | 78 | 1 050 | 925 | 7 | – | – |
| 75×1200 | 3×48 | | | 1 250 | 1 100 | 8 | – | – |
| 75×1500 | 3×60 | | | 1 600 | 1 400 | 10 | – | – |
| 100×1000 | 4×40 | 103 | 98 | 1 050 | 925 | 12 | – | – |
| 100×1200 | 4×48 | | | 1 250 | 1 100 | 15 | – | – |
| 100×1500 | 4×60 | | | 1 600 | 1 400 | 18 | – | – |
| 125×1000 | 5×40 | 132 | 127 | 1 050 | 925 | 19 | – | – |
| 125×1200 | 5×48 | | | 1 250 | 1 100 | 23 | – | – |
| 125×1500 | 5×60 | | | 1 600 | 1 400 | 29 | – | – |
| 150×1200 | 6×48 | 154 | 149 | 1 250 | 1 100 | 34 | – | – |
| 150×1500 | 6×60 | | | 1 600 | 1 400 | 43 | – | – |
| 200×1200 | 8×48 | 205 | 200 | 1 250 | 1 100 | 63 | 65 | 66 |
| 200×1500 | 8×60 | | | 1 600 | 1 400 | 79 | 81 | 83 |
| 200×1800 | 8×72 | | | 1 905 | 1 700 | 94 | 98 | 100 |
| 225×1500 | 9×60 | 230 | 225 | 1 600 | 1 400 | 96 | 133 | 135 |
| 225×1800 | 9×72 | | | 1 905 | 1 700 | 115 | 160 | 162 |
| 250×1500 | 10×60 | 256 | 251 | 1 600 | 1 400 | 120 | 130 | 132 |

| Стандарт | | Діаметр | | Довжина | | Типова маса без ніпеля | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Макс | Мін | Макс | Мін | PR Марка ЕГ | HP Марка ЕГП | UHP Марка ЕГСП |
| мм | дюйм | мм | мм | мм | мм | кг | кг | кг |
| 250×1800 | 10×72 | | | 1 905 | 1 700 | 144 | 156 | 158 |
| 300×1500 | 12×60 | 307 | 302 | 1 600 | 1 400 | 169 | 186 | 190 |
| 300×1800 | 12×72 | | | 1 905 | 1 700 | 203 | 223 | 228 |
| 350×1500 | 14×60 | 357 | 352 | 1 600 | 1 400 | 234 | 250 | 257 |
| 350×1800 | 14×72 | | | 1 905 | 1 700 | 280 | 300 | 308 |
| 350×2100 | 14×84 | | | 2 210 | 1 975 | 327 | 350 | 360 |
| 350×2400 | 14×96 | | | 2 515 | 2 275 | 374 | 400 | 411 |
| 400×1500 | 16×60 | 409 | 403 | 1 600 | 1 400 | 313 | 325 | 328 |
| 400×1800 | 16×72 | | | 1 905 | 1 700 | 375 | 390 | 393 |
| 400×2100 | 16×84 | | | 2 210 | 1 975 | 437 | 454 | 458 |
| 400×2400 | 16×96 | | | 2 515 | 2 275 | 500 | 519 | 524 |
| 450×1500 | 18×60 | 460 | 454 | 1 600 | 1 400 | – | 416 | 422 |
| 450×1800 | 18×72 | | | 1 905 | 1 700 | – | 500 | 506 |
| 450×2100 | 18×84 | | | 2 210 | 1 975 | – | 583 | 590 |
| 450×2400 | 18×96 | | | 2 515 | 2 275 | – | 666 | 674 |
| 500×1500 | 20×60 | 511 | 505 | 1 600 | 1 400 | 477 | 501 | 503 |
| 500×1800 | 20×72 | | | 1 905 | 1 700 | 572 | 602 | 604 |
| 500×2100 | 20×84 | | | 2 210 | 1 975 | 668 | 702 | 705 |

| Стандарт | | Діаметр | | Довжина | | Типова маса без ніпеля | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Макс | Мін | Макс | Мін | PR Марка ЕГ | HP Марка ЕГП | UHP Марка ЕГСП |
| мм | дюйм | мм | мм | мм | мм | кг | кг | кг |
| 500×2400 | 20×96 | | | 2 515 | 2 275 | 763 | 802 | 806 |
| 550×2100 | 22×84 | 562 | 556 | 2 210 | 1 975 | – | – | 874 |
| 550×2400 | 22×96 | | | 2 515 | 2 275 | – | – | 998 |
| 550×2700 | 22×110 | | | 2 895 | 2 550 | – | – | 1 123 |
| 600×2100 | 24×84 | 613 | 607 | 2 210 | 1 975 | 976 | 1 044 | 1 046 |
| 600×2400 | 24×96 | | | 2 515 | 2 275 | 1 115 | 1 192 | 1 194 |
| 600×2700 | 24×110 | | | 2 895 | 2 550 | 1 255 | 1 343 | 1 345 |
| 650×2100 | 26×84 | 663 | 657 | 2 210 | 1 975 | – | – | 1 207 |
| 650×2400 | 26×96 | | | 2 515 | 2 275 | – | – | 1 380 |
| 650×2700 | 26×110 | | | 2 895 | 2 550 | – | – | 1 552 |
| 700×2100 | 28×84 | 714 | 708 | 2 210 | 1 975 | 1 327 | – | – |
| 700×2400 | 28×96 | | | 2 515 | 2 275 | 1 517 | – | – |
| 700×2700 | 28×110 | | | 2 895 | 2 550 | 1 707 | – | – |

### 3.2 Огляд світових виробників графітових електродів

В Топ-10 світових виробників графітових електродів входять:

1) GrafTech International Ltd. (США)

GrafTech International є одним з найбільш надійних і шанованих виробників графітових електродів (рис. 3.4) у світі. Компанія виробляє високоякісні вуглецеві

Таблиця 3.3 – Рекомендовані зусилля під час нарощування колони

| Номінальний діаметр електрода | | Крутний момент |
|---|---|---|
| | | |
| 75 | 3 | 30 |
| 100 | 4 | 50 |
| 125 | 5 | 90 |
| 150 | 6 | 130 |
| 175 | 7 | 200 |
| 200 | 8 | 250 |
| 225 | 9 | 350 |
| 250 | 10 | 450 |
| 300 | 12 | 650 |
| 350 | 14 | 850 |
| 400 | 16 | 1100 |
| 450 | 18 | 1500 |
| 500 | 20 | 2500 |
| 550 | 22 | 3500 |
| 600 | 24 | 4000 |
| 650 | 26 | 5000 |
| 700 | 28 | 6000 |

та графітові вироби для сталеливарної промисловості та кольорової

промисловості. Компанія GrafTech International представлена на п'яти континентах, маючи заводи в Європі, Північній Америці, Азії та Південній Америці.



Рисунок 3.4 – Графітові електроди GrafTech International Ltd.

2) SGL Carbon (Німеччина)

Компанія SGL Carbon має виробничі майданчики по всьому світу, включаючи США та Китай. SGL Carbon спеціалізується на виробництві графітових електродів (рис. 3.5) для сталеливарної промисловості та інших суміжних галузей. Вони пропонують високоякісні графітові електроди з високими електричними і механічними властивостями, стійкістю до окислення і хорошою стійкістю до термічних ударів.

Асортимент продукції SGL Carbon включає електроди для дугових сталеплавильних печей (EAF), печей-ковшів (LF) і дугових печей під флюсом

(SAF). Компанія прагне надавати відмінний сервіс та продукцію для своїх клієнтів по всьому світу.

Розміри графітових електродів SGL Carbon та їх типові властивості приведені в таблицях 3.4 та 3.5.



Рисунок 3.5 – Графітові електроди SGL Carbon

3) Showa Denko (Японія)

Японська компанія Showa Denko відома своїми виробничими можливостями, які дозволяють їй виготовляти графітові електроди (рис. 3.6) для різних застосувань. Зосередженість компанії на інноваціях та розвитку забезпечує клієнтів індивідуальними рішеннями та технічною підтримкою.

4) Fangda Carbon New Material Co., Ltd. (Китай)

Fangda зарекомендувала себе як надійний партнер у сталеливарній та металургійній промисловості, а її продукція відповідає суворим міжнародним стандартам якості (рис. 3.7). Вони також пропонують відмінну технічну підтримку та післяпродажне обслуговування для забезпечення задоволеності клієнтів.

Таблиця 3.4 – Розміри графітових електродів SGL Carbon

| Розміри графітового електрода | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Номінальний Ø | | Повна толерантність | | | | Номінальна довжина | |
| | | Низька толерантність | | Верхня толерантність | | | |
| мм | дюйм | хв. мм | макс. мм | мін. мм | макс. мм | мм | дюйм |
| 350 | 14 | 352 | 355 | 355 | 357 | 1500, 1800, 2100, 2400 | 60, 72, 84, 96 |
| 400 | 16 | 403 | 406 | 406 | 409 | 1500, 1800, 2100, 2400 | 60, 72, 84, 96 |
| 450 | 18 | 454 | 457 | 457 | 460 | 1800, 2100, 2400 | 72, 84, 96 |
| 500 | 20 | 505 | 508 | 508 | 511 | 1800, 2100, 2400, 2700 | 72, 84, 96, 110 |
| 550 | 22 | 556 | 558 | 558 | 562 | 2100, 2400, 2700 | 84, 96, 110 |
| 600 | 24 | 607 | 609 | 609 | 613 | 1500, 2100, 2400, 2700 | 60, 84, 96, 110 |
| 650 | 26 | 657 | 660 | 660 | 663 | 2100, 2400, 2700 | 84, 96, 110 |
| 700 | 28 | 708 | 711 | 711 | 714 | 2100, 2400, 2700 | 84, 96, 110 |
| 750 | 30 | 759 | 762 | 762 | 765 | 2400, 2700 | 96, 110 |
| 800 | 32 | 810 | 812 | 812 | 816 | 2400, 2700 | 96, 110 |

Таблиця 3.5 – Типові властивості графітових електродів SGL Carbon

| Типові властивості графітових електродів | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Діаметр | мм<br>дюйм | 350 - 450<br>14 - 18 | 500 - 650<br>20 - 26 | 700 - 800<br>28 - 32 |
| Видима щільність | г/см3 | 1,60 – 1,75 | 1,67 – 1,77 | 1,68 – 1,77 |
| Питомий електричний опір | Охммм | 5,0 – 7,5 | 4,5 – 5,5 | 4,0 – 5,5 |
| Міцність на згин | Н/мм2 | 8 – 13 | 10 – 13 | 10 – 13 |
| Теплопровідність | Вт/(км) | 220 – 270 | 250 – 280 | 250-300 |
| Коефіцієнт теплового розширення | мкм/(км) | 0,5 – 1,1 | 0,3 – 0,6 | 0,3 – 0,6 |

5) Graphite India (Індія)

Graphite India має три виробничі потужності в Індії і є одним з найбільших постачальників графітових електродів (рис. 3.8) в країні. Асортимент продукції Graphite India включає графітові електроди для електродугових печей, ковшів, печей під флюсом та індукційних печей. Крім того, компанія пропонує повний спектр графітових електродів та аксесуарів, таких як графітові блоки, тиглі, вкладиші та електродні ковпачки. Компанія сертифікована за ДСТУ ISO 9001:2015 Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT) і дотримується суворих процесів контролю якості для забезпечення задоволеності

клієнтів. Завдяки інноваційним виробничим процесам та надійній продукції, Graphite India є одним з провідних виробників графітових електродів у світі.




Рисунок 3.6 – Графітові електроди Showa Denko

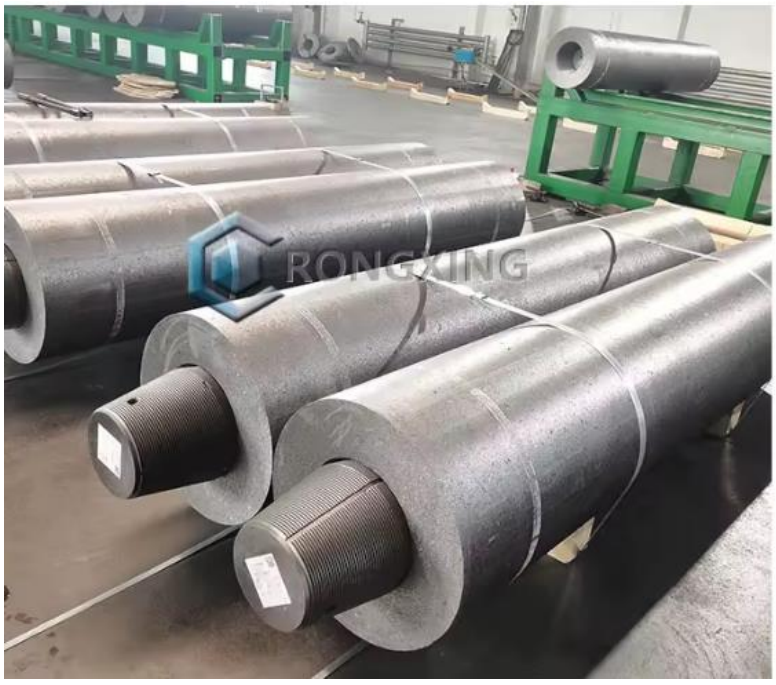



Рисунок 3.7 – Графітові електроди Fangda Carbon New Material Co., Ltd.



Рисунок 3.8 – Графітові електроди Graphite India

6) Tokai Carbon Co., Ltd. (Японія)

Tokai Carbon – японська компанія, що спеціалізується на виробництві вуглецевих і графітових виробів (рис. 3.9) та їхньому застосуванні. Найбільш відома завдяки виробництву високоякісних графітових електродів і марок UHP (надвисокої потужності), які використовуються для виробництва сталі, виплавки алюмінію та інших процесів. Tokai Carbon пропонує різні інші продукти на основі вуглецю, такі як попередньо спечені аноди, вуглецеві матеріали для паливні елементита багато іншого. Маючи виробничі потужності в Японії, США, Китаї та Індії, Tokai Carbon обслуговує клієнтів по всьому світу.

7) Jilin Carbon Co., Ltd. (Китай)

Jilin Carbon розташована в Китаї та спеціалізується на виробництві графітових електродів (рис. 3.10), вуглецевих волокон, електродні пастита багато іншої продукції. Відома своєю винятковою якістю та продуктивністю, ця продукція позиціонує компанію як одного з провідних виробників графітових

електродів у Китаї. Конкурентна перевага Jilin Carbon випливає з інтеграції передових виробничих технологій з постійними інноваціями в розробці продукції. Компанія може похвалитися незалежним технологічним центром і визнаною державою професійною лабораторією, що ще більше розширює їхній досвід і можливості.




Рисунок 3.9 – Графітові електроди Tokai Carbon Co., Ltd.

8) Dan Carbon Co., Ltd. (Китай)

Dan Carbon також базується в Китаї. Компанія виробляє високоякісні, економічно ефективні графітові електроди (рис. 3.11) для різних застосувань і галузей промисловості, включаючи виробництво сталі в електродугових печах, виплавку алюмінію тощо. Компанія пропонує широкий асортимент продукції, включаючи UHP, RP і RP марок. Dan Carbon також пропонує додаткові послуги, такі як проектування та розробка, механічна обробка та індивідуальні розміри, щоб задовольнити потреби своїх клієнтів. Найсучасніші виробничі потужності Dan Carbon мають передові технології та суворі процеси контролю якості, що

забезпечують надійну роботу та стабільність продукції.



Рисунок 3.10 – Графітові електроди Jilin Carbon Co., Ltd.



Рисунок 3.11 – Графітові електроди Dan Carbon Co., Ltd.

9) HEG Limited (Індія)

HEG (Hindalco Industries Limited) – провідний індійський виробник графітових електродів (рис. 3.12). Заснована в 1958 році, HEG є дочірньою компанією Aditya Birla Group, індійського багатонаціонального конгломерату зі штаб-квартирою в Мумбаї. Вони виробляють широкий асортимент графітових електродів і супутніх продуктів, що використовуються в електродуговому виробництві. піч та печі-ковші для виробництва сталі. Компанія має кілька виробничих заводів по всій Індії, оснащених сучасними технологіями та кваліфікованими кадрами.

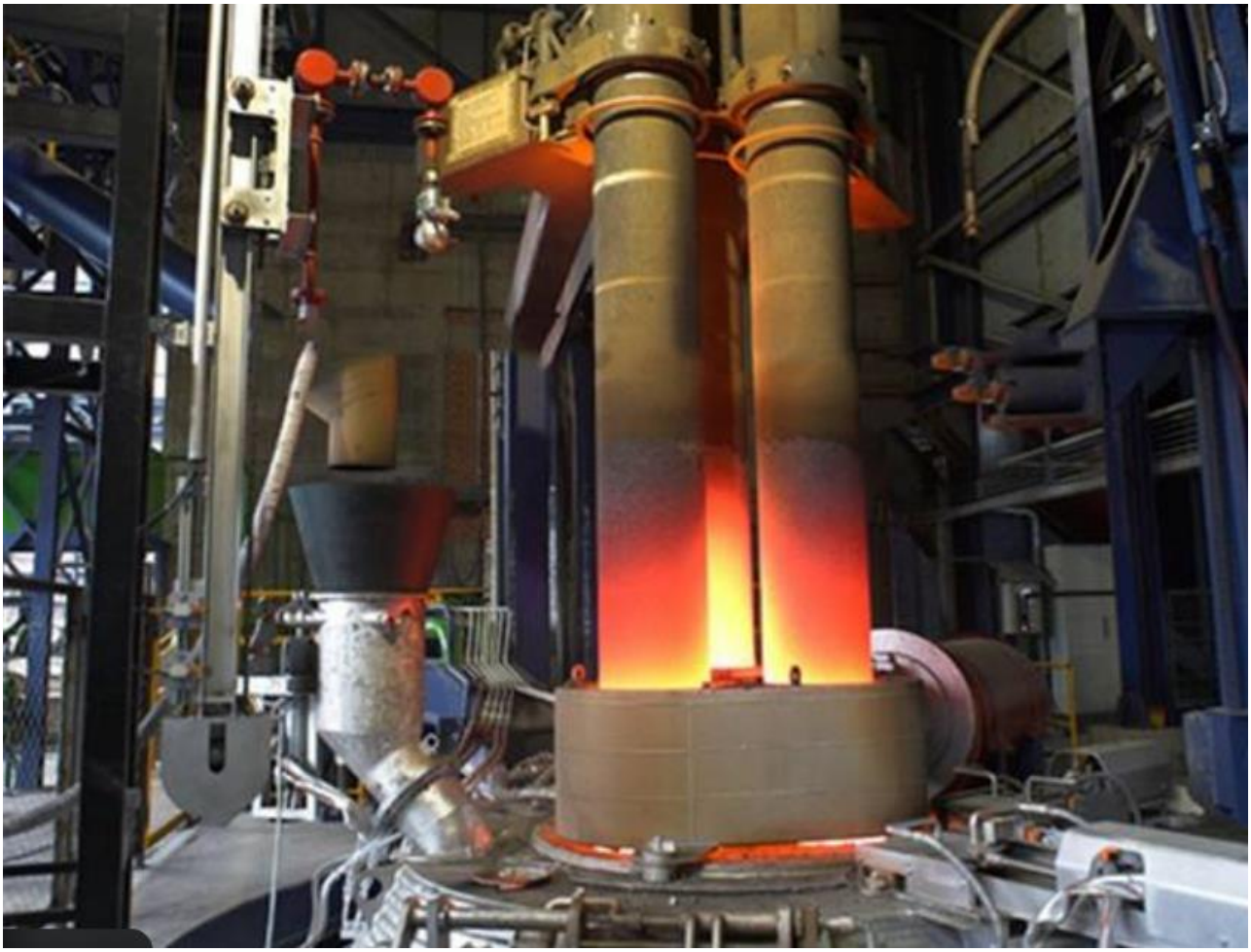


Рисунок 3.12 – Графітові електроди HEG Limited

10) Nippon Carbon Co., Ltd. (Японія)

Японська компанія Nippon Carbon постачає різноманітні графітові

електроди (рис. 3.13) для різних застосувань – від дугових сталеплавильних печей до індукційних печей. Компанія також має ряд інших матеріалів на основі графіту, включаючи вуглецеве волокно і карбід кремнію. Крім того, Nippon Carbon спеціалізується на дослідженнях і розробках для створення нових продуктів і технологій, які можуть забезпечити більш ефективне споживання енергії.




Рисунок 3.13 – Графітові електроди Nippon Carbon Co., Ltd.

Також відома компанія JINSUN Carbon – це китайський виробник, який віддано розробляє графітові електроди (рис. 3.14) та вуглецеві вироби для електросталеплавильної та плавильної промисловості. Продукція компанії включає UHP, HP та RP графітовий електрод, які в основному використовуються в електродуговій печі, рафінувальній печі та дуговій печі під флюсом. Катодні блоки для електролізу алюмінію, вугільні електроди та вугільні пасти для малих електродугових печей і печей для виплавки феросплавів.

Надвисокопірні графітові електроди використовуються в електродугових печах та високонавантажувальних ковшових печах. Цей електрод характеризується низьким електричним опором і високим допустимим струмовим навантаженням. У процесі виплавки сталі електродугових печах допустима щільність струму перевищує 25 А/см². Для виробництва надвисокоміцних

графітових електродів як сировина використовується голковий кокс, а в процесі виробництва застосовуються багаторазове просочення та випал. З швидким розвитком електродугової виплавки стали все більшої популярності набувають потужні та надпотужні електродугові печі. Ми виробляємо та поставляємо графітові електроди діаметром від 250 до 600 мм з ніпелями.

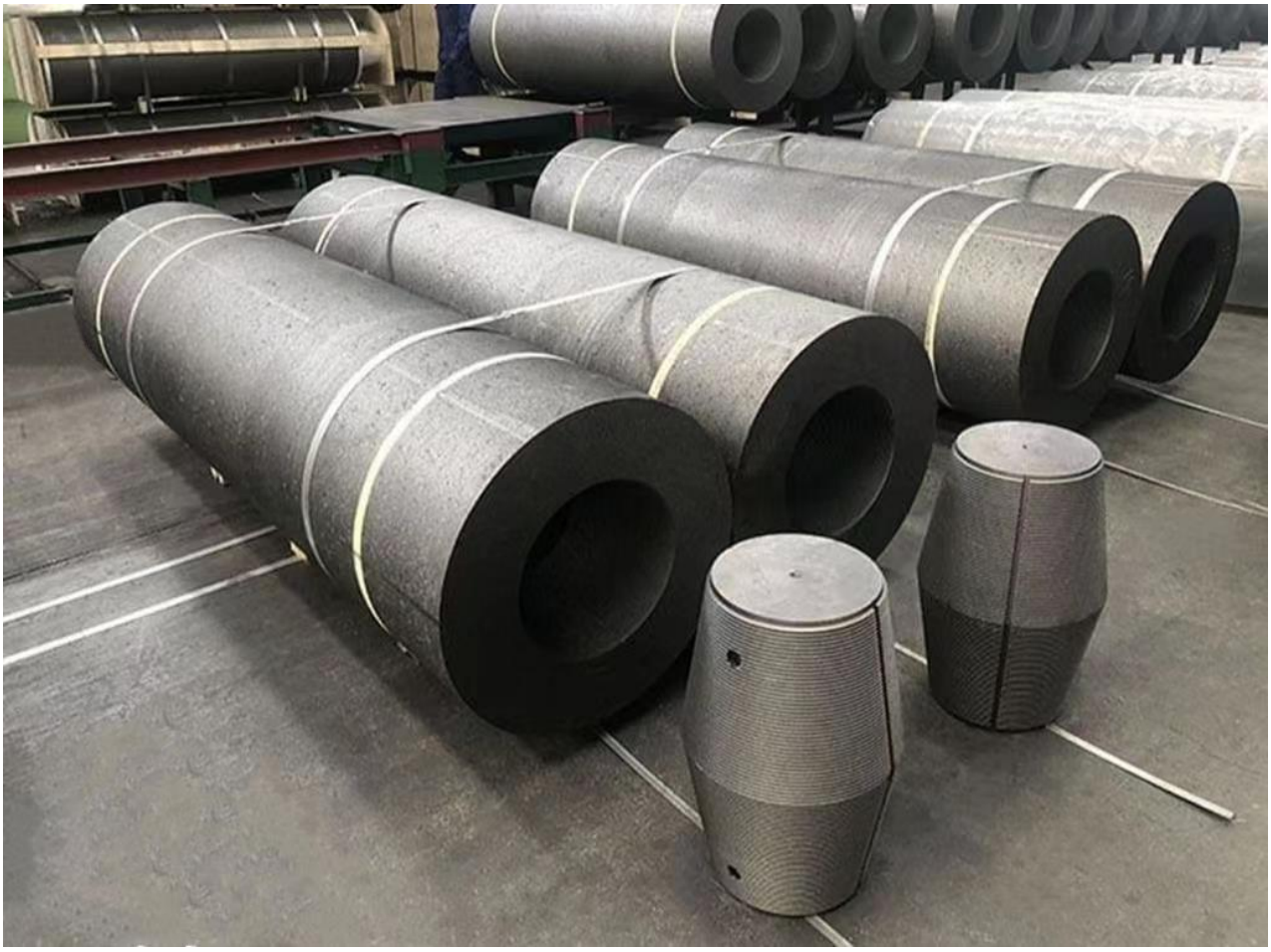


Рисунок 3.14 – Графітові електроди JINSUN Carbon

# 4 ОГЛЯД ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРОДІВ МЕТАЛУРГІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Підвищення стійкості електродів металургійного призначення (зокрема графітованих електродів для дугових сталеплавильних печей, електродів для феросплавних печей та інші) є важливим чинником зниження витрат і підвищення ефективності виробництва. Основні шляхи підвищення стійкості електродів металургійного призначення наступні:

А. Удосконалення складу та структури матеріалу:

Поліпшення сировинної бази для виготовлення електродів:

- Використання високоякісного нафтового або голчастого коксу з низьким вмістом сірки та золи.
- Застосування пеків із оптимальними зв’язуючими властивостями.

– Оптимізація зернового складу

- Раціональний підбір фракцій для зменшення пористості.
- Формування щільної структури з мінімальною кількістю мікротріщин.

– Підвищення щільності електродів (збільшення їх маси на одиницю об’єму ($\rho = m/V$) або зменшення пористості матеріалу з метою покращення електричних і механічних властивостей):

- Додаткове просочення пеком або смолами.
- Повторне випалювання для зменшення відкритої пористості.

Б. Удосконалення технології виробництва електродів:

– Контроль режимів випалювання електродів (забезпечення оптимальних параметрів термічної обробки (температури, часу, швидкості нагріву й охолодження, атмосфери печі) для формування необхідної структури та властивостей електрода):

- Плавний температурний режим для зменшення внутрішніх напружень.
- Забезпечення рівномірного прогріву по всьому об’єму електрода.

Правильний контроль режимів випалювання електродів забезпечує:

✔ Підвищення щільності матеріалу.

✔ Зменшення пористості.

✔ Покращення електропровідності.

✔ Зниження крихкості.

✔ Збільшення ресурсу електрода.

Порушення режиму контроль режимів випалювання електродів може призвести до: внутрішніх дефектів, нерівномірної структури, підвищеного окиснення, передчасного руйнування під час роботи.

– Оптимізація процесу графітації

- Підвищення ступеня графітації для зменшення електричного опору.
- Контроль температури (в межах до 2800–3000 °C) для формування стабільної кристалічної структури.

– Механічна обробка електродів (сукупність операцій з надання електродам точної геометричної форми, необхідних розмірів і якості поверхні для забезпечення їх надійної роботи в електродугових печах або інших установках):

- Точність виготовлення різьбових з’єднань (ніпелів).
- Зменшення концентрації напружень у місцях стикування.

Недоліки механічної обробки можуть призвести до руйнування в зоні ніпеля, нестабільного контакту підвищеного нагріву та аварійних ситуацій на підприємстві.

В. Захист від окиснення

Електроди активно окислюються при високих температурах (особливо понад 500–600 °C) Ті це має серйозні наслідки для роботи обладнання.

При високих температурах метал електрода реагує з киснем повітря за реакцією:

$$Me+O_2 \rightarrow MeO \qquad (4.1)$$

Утворюється оксидна плівка**,** яка знижує електропровідність, погіршує

контакт, підвищує електричний опір, збільшує нагрів та пришвидшує руйнування матеріалу.

– Нанесення захисних покриттів на електроди (антиокиснювальні покриття (керамічні, фосфатні, силікатні) та вогнетривкі обмазки).

Нанесення захисних покриттів на електроди (наприклад, графітовані у руднотермічних печах) здійснюється для запобігання високотемпературному окисненню, зменшення бокового згоряння та підвищення терміну експлуатації.

Зазвичай використовують тугоплавкі, антиокиснювальні покриття (спеціальні склади на основі тугоплавких оксидів, карбідів або кремнію, які створюють бар'єр для кисню при високих температурах), що знижують витрату електродної маси.

Електродугова металізація застосовується для нанесення захисних та відновних металевих шарів, що підвищує зносостійкість.

Термодифузійне насичення – це метод, що дозволяє змінити структуру поверхні електрода для кращої стійкості.

Нанесення вогнетривких обмазок на електроди – це ефективний спосіб захисту від високотемпературного окислення та ерозії, що підвищує термін їх експлуатації. До складу обмазок зазвичай входять тугоплавкі оксиди ($Al_2O_3$, $SiO_2$, $ZnO_2$), що утворюють жаростійкі плівки. Технологія включає підготовку поверхні, нанесення суміші та подальшу сушку/запікання.

Основні характеристики та переваги захисних обмазок:

—— Функції: Захист від окислення повітрям при високих температурах, запобігання бічному обгоранню графітованих електродів, зниження витрат вуглецю.

—— Склад: До складу входять вогнетривкі порошки (карбіди, нітриди, оксиди) та зв’язуючі компоненти, які утворюють захисний шар.

—— Методи нанесення: Нанесення обмазки може здійснюватися за допомогою щіток, валиків, розпилення або занурення електродів у спеціальні суміші.

—— Ефект: Підвищення стійкості електродів, зниження собівартості

виробництва за рахунок зменшення питомої витрати електродної маси.

– Контроль атмосфери:

- Мінімізація доступу кисню до зони електрода.
- Використання інертних або відновлювальних середовищ.

Г. Оптимізація режимів експлуатації електродів:

– Контроль електричних параметрів (стабільна подача струму та уникнення різких коливань навантаження).

– Запобігання механічним навантаженням:

- Правильне центрування електродів (це точне розташування електродів відносно осі печі та один одного з метою забезпечення рівномірного розподілу електричної дуги й теплового навантаження).

У трифазній дуговій сталеплавильній печі електроди повинні: бути симетрично розміщені, мати однакову відстань до центру ванни, працювати з однаковою довжиною дуги та мати правильне вертикальне положення.

Навіть невелике зміщення може впливати на роботу всієї печі.

Наслідки неправильного центрування електродів: нерівномірний нагрів металу, підвищене локальне зношування футерівки, нестабільність електричної дуги, перевитрата електроенергії, підвищене окиснення та нерівномірне зношування електродів та механічні навантаження на електродну колону.

Перевагами правильного центрування електродів: рівномірний розподіл тепла, стабільна електрична дуга, зменшення витрат електродів, економія електроенергії, збільшення ресурсу футерівки печі (зокрема ДСП), зниження аварійності на підприємстві.

Центрування електродів забезпечується: точним налаштування електродотримачів, перевіркою геометрії електродної колони, автоматичними системами позиціонування, проведенням регулярного технічного контролю та використанням лазерних або механічних вимірювальних систем.

- Уникнення ударів шихти з електродами (комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на запобігання механічному контакту металобрухту (шихти) з електродами під час завантаження та плавки в

електродуговій печі).

Під час завантаження шихти можливі: удари великих шматків брухту по електродах, перекіс або зміщення електродної колони, утворення тріщин у графіті, пошкодження різьбових з'єднань (ніпелів) та обрив електрода.

Графітові електроди мають високу електропровідність, але відносно крихкі на удар, тому механічні пошкодження є однією з частих причин їх аварійного руйнування.

Наслідками ударів електродів о шихту э: тріщини та сколи, підвищене окиснення через мікродефекти, нестабільність дуги, аварійні зупинки печі та значні економічні втрати.

Для запобігання ударів електродів о шихту треба: **к**онтрольоване завантаження шихти, правильне формування корзини з брухтом, використання легшої фракції у верхніх шарах, піднімання електродів перед завантаженням, автоматизовані системи керування положенням електродів та своєчасне проведення інструктажу та дисципліна персоналу.

– Раціональна довжина виступу електрода (оптимальна відстань, на яку електрод виступає з електродотримача (або від контактних щік) у робочу зону печі, що забезпечує стабільну дугу, мінімальні втрати тепла та економне зношування електрода).

Раціональна довжина електрода залежить від діаметра електрода, потужність печі, сили струму, фази плавки, типу шихти та конструкції електродотримача.

Зазвичай довжина виступу становить приблизно 1,5–2,5 діаметра електрода, але конкретне значення визначається технологічним режимом.

- Мінімізація перегріву робочої частини.

Д. Конструктивні вдосконалення:

- Використання ніпелів підвищеної міцності (застосування з'єднувальних елементів (ніпелів) із покращеними механічними та термічними характеристиками для з'єднання електродів, найчастіше в електродугових печах).

Під час роботи ніпель зазнає: високих механічних навантажень, вібрацій, термічних ударів, впливу високих температур, дії електромагнітних сил.

Недостатня міцність може спричинити: тріщини у зоні різьби, обрив колони електродів, аварійну зупинку печі, значні економічні втрати.

- Розробка електродів з армованими вставками (це створення електродів, конструкція яких підсилена внутрішніми або зовнішніми елементами (вставками) з матеріалів підвищеної міцності для покращення їх механічних та експлуатаційних характеристик). В якості матеріалів можуть використовуватись металеві стрижні або втулки, композитні матеріали, вуглецеві або керамічні волокна армуючі кільця у зоні різьбового з'єднання
- Покращення систем охолодження електродотримачів (комплекс технічних заходів, спрямованих на зниження температури електродотримача під час роботи, запобігання його перегріву та продовження строку служби обладнання).

Основні способи покращення охолодження електродотримачів:

1. Модернізація водяного охолодження (збільшення пропускної здатності каналів, оптимізація циркуляції води, використання теплообмінників).
2. Покращення конструкції (застосування матеріалів з вищою теплопровідністю (мідні сплави), збільшення площі тепловідведення, інтеграція радіаторних елементів).
3. Повітряне охолодження (встановлення додаткових вентиляторів, спрямований повітряний потік).
4. Системи моніторингу температури (датчики перегріву, автоматичне вимкнення при критичних температурах).
5. Використання охолоджувальних рідин нового покоління (антифризи,

спеціальні теплоносії).

Результатами впровадження заходів покращення охолодження електродотримачів є: стабільніша робота обладнання, зменшення простоїв,

економія на ремонті, підвищення безпеки праці та умов праці, збільшення ресурсу електродотримача.

Недостатнє охолодження електродотримачів призводить до: перегріву контактів, руйнування ізоляції, зниження провідності, аварійних зупинок печі, підвищеної небезпеки для персоналу цеху або лабораторії.

Е. Контроль якості та моніторинг – система технічних і організаційних заходів, спрямованих на перевірку відповідності електродів встановленим стандартам під час виготовлення та контроль їхнього стану в процесі експлуатації. Контроль якості та моніторинг включає:

- Неруйнівний контроль (ультразвук, рентген).
- Аналіз швидкості питомої витрати електродів (кг/т сталі).
- Впровадження систем цифрового моніторингу в дугових сталеплавильних печах.

Контроль якості на етапі виробництва перевіряє: щільність, пористість**,** **м**іцність на згин і стискання, електричний опір, теплопровідність, точність геометричних розмірів та якість різьби та ніпельного гнізда.

Використовують наступні методи контролю:

- ультразвукова дефектоскопія;
- візуальний контроль;
- вимірювання електричного опору;
- механічні випробування;
- рентген-контроль (для виявлення внутрішніх дефектів).

Таким чином, очікуваний ефект від впровадження заходів підвищення стійкості електродів металургійного призначення наступний:

– зниження питомої витрати електродів;

– зменшення кількості обривів;

– підвищення енергоефективності печі;

– зменшення собівартості металопродукції.

# 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТАТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

## 5.1 Заходи безпеки при використанні графітових електродів електропечей

Основними небезпечними факторами при використанні графітових електродів електропечей є:

– ураження електричним струмом (великі струми, висока напруга);
– висока температура та інфрачервоне випромінювання;
– бризки розплавленого металу та шлаку;
– виділення чадного газу (CO);
– графітовий пил під час монтажу/обробки;
– механічна небезпека (падіння або руйнування електрода);
– підвищений рівень шуму.

Технічними заходами безпеки при використанні графітових електродів електропечей є:

1. Електробезпека:

- Обов’язкове заземлення печі та металоконструкцій.
- Використання блокувальних систем, що виключають роботу під напругою під час обслуговування.
- Заборона будь-яких робіт на електродах при ввімкненій печі.
- Регулярна перевірка ізоляції струмопідвідних частин.

2. Безпека під час монтажу та заміни електродів:

- Використання спеціальних траверс, захватів і вантажопідіймальних механізмів.
- Заборона ударів по різьбі електродів.
- Перевірка стану ніпелів і різьбового з’єднання.
- Дотримання рекомендованого моменту затягування.
- Заборона перебування людей під підвішеним електродом.

3. Захист від високої температури:

- Дистанційне керування електродами.
- Використання теплозахисних екранів.
- Обмеження доступу в небезпечну зону під час плавки.

4. Газова та вентиляційна безпека:

- Постійний контроль концентрації CO.
- Справна система аспірації та вентиляції.
- Використання стаціонарних або переносних газоаналізаторів.

5. Пилова безпека:

- Використання промислових пилососів.
- Заборона сухого підмітання.
- Зберігання електродів у сухому приміщенні.

6. Пожежна безпека:

- Наявність порошкових або вуглекислотних вогнегасників.
- Заборона зберігання легкозаймистих матеріалів поблизу печі.
- Проведення регулярних інструктажів з пожежної безпеки.

## 5.2 Засоби індивідуального захисту при використанні графітових електродів електропечей

Серед засобів індивідуального захисту при використанні графітових електродів електропечей є:

1. Обов’язкові засоби:

- Вогнетривкий спецодяг (з термостійких тканин).
- Теплостійкі рукавиці.
- Захисна каска (рис. 5.1).
- Захисний щиток або окуляри.
- Захисне взуття з металевим підноском.
- Респіратор класу FFP2 (рис. 5.2) або FFP3 (при роботі з пилом).

2. Додаткові засоби:

- Тепловідбивний фартух.

- Протишумні навушники або беруші (рис. 5.3).
- Діелектричні засоби захисту (при роботах з електрообладнанням).



Рисунок 5.1 – Каска захисна без вентиляції «Safe-guard 3160»




Рисунок 5.2 – Респіратор 3M Aura™ 9322 FFP2 з клапаном



Рисунок 5.3 – Беруші протишумні 3M 1110 зі шнурком SNR 37 дБ

## 5.3 Заходів безпеки при виконанні зварювальних робіт

Заходи безпеки при виконанні зварювальних робіт наступні:

1. Перевірка обладнання – огляд зварювального апарату, кабелів: силових, утримувача електродів, маси. Оболонка електропроводів має бути без ознак пошкоджень. На мідних чи латунних клемах, а також роз'ємах не допускається наявність слідів окислення. З'єднання тримача та маси з контактами зварювального апарату повинні бути надійними, щоб елементи не нагрівалися під час проходження через них струму.

2. Під'єднання заземлювального кабелю – до корпусу зварювального апарату і конструкцій, що зварюються, підводять заземлення – провід від металевого стрижня, вкопаного в грунт. Опір заземлювача має перевищувати 5 Ом.

3. Захист обладнання від вологи – заборонено працювати в умовах підвищеної вологості, під дощем, з мокрими руками або у мокрому взутті чи одязі. Потрібно уникати контакту кабелів із водою, олією, гострими елементами металоконструкцій. Для захисту апарата від дощу чи снігу необхідно використовувати навіс.

4. Запобігання працівникам від ударів струмом – слід використовувати діелектричні килимки або підставки під час роботи, особливо у приміщеннях з підвищеною вологістю. Замінювати електроди в тримачі потрібно тільки в сухих рукавичках, не торкаючись одночасно електрода і деталей, що зварюються.

5. Пожежна безпека – перед зварюванням потрібно очистити робочу зону від легкозаймистих матеріалів: паперу, ганчірки, дерев'яних елементів, горючих рідин та газів. Не зняті легкозаймисті конструкції (стіни, підлоги) можна захистити металевими екранами або азбестом і брезентом. Біля місця зварювання повинні бути вогнегасники: вуглекислий або порошковий, ящик з піском, відро з водою. Відпрацьовані гарячі електроди для зварювання (або їх залишки) необхідно помістити в металевий ящик (рис. 5.4).

6. Контроль робочої зони після закінчення роботи – необхідно ретельно оглянути місце зварювання та прилеглі приміщення, загасити пожежі.

7. Захист працівників від ультрафіолетового випромінювання – якщо в приміщенні, крім зварювальника, працюють інші працівники, місце проведення зварювальних робіт повинно бути огороджено протипожежними екранами або шторами заввишки не менше 1,8 м.

8. Захист органів дихання від диму – слід забезпечити хорошу вентиляцію приміщення, особливо при тривалій роботі. При зварюванні в замкнутих приміщеннях (резервуари, тунелі) з матеріалами, що виділяють особливо шкідливі речовини (оцинкована сталь, фарби, покриття), застосовуються витяжні пристрої.




Рисунок 5.4 – Пожежна безпека під час проведення газо-та електрозварювальних робіт

Отже, основні правила безпеки при роботі з електродами:

– переконайтеся, що робоче місце та обладнання належним чином заземлені;

– використовуйте відповідні захисні засоби, такі як рукавиці та окуляри;

– не доторкайтеся до джерела струму під час роботи з електродами;

– перш ніж розпочати роботу, ознайомтеся з інструкціями виробника та всіма правилами техніки безпеки.

## 5.4 Засоби індивідуального захисту при виконанні зварювальних робіт

Серед засобів індивідуального захисту (рис. 5.5), що використовують під час зварювальних робіт, слід виділити:

– для захисту обличчя та очей необхідно використовувати зварювальний щиток. Пластикова або волокниста маска захистить від бризок та іскор, а світлофільтр захистить сітківку ока;



Рисунок 5.5 – Засоби індивідуального захисту при виконанні зварювальних робіт

– маски-хамелеони оснащені рідкокристалічним склом, яке автоматично темніє при запалюванні дуги і світлішає при її розриві. На щитках із РК-фільтрами є регулювання чутливості, затримки включення та ступеня затемнення;

– для захисту рук використовують краги зварювальника або рукавиці з вогнестійкої спилкової шкіри. Рукавиці можуть бути виготовлені із брезенту.

## 5.5 Техногенна безпека

Техногенна безпека – стан захищеності населення, території, об’єктів від негативних наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру.

В Україні це питання забезпечення техногенної безпеки на небезпечних об’єктах (рис. 5.6) регулює Кодекс цивільного захисту, який передбачає комплекс заходів і стратегій для запобігання та реагування на надзвичайні ситуації техногенного характеру, а саме:

- оцінювання ризиків виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру на підпорядкованих небезпечних об’єктах відповідної галузі;
- інформування органів влади, сил цивільного захисту про основні загрози на небезпечних об’єктах з метою вжиття ними ефективних заходів захисту населення, промислових і сільськогосподарських об’єктів від надзвичайних ситуацій техногенного характеру;
- інформування органів управління та сил цивільного захисту про аварійні та небезпечні ситуації, розвиток яких призвів або міг призвести до аварії й завдати шкоди життю та здоров’ю населення й навколишньому середовищу;
- розміщення інформації про заходи безпеки та дії населення у разі виникнення надзвичайної ситуації техногенного характеру на офіційних сайтах, інформаційних стендах та в засобах масової інформації;
- організацію заходів щодо захисту своїх робітників від шкідливого

впливу надзвичайних ситуацій техногенного характеру;

- утворення об’єктових формувань та спеціалізованих служб цивільного захисту, створення матеріально-технічної бази для їх функціонування, забезпечення готовності таких формувань до дій за призначенням;
-



Рисунок 5.6 – Потенційно небезпечний об’єкт

- навчання працівників правил техногенної безпеки;
- створення та підтримання готовності диспетчерських служб;
- розроблення аварійних планів об’єктів, де здійснюється практична діяльність, пов’язана з радіаційними або радіаційно-ядерними технологіями;
- розроблення планів локалізації та ліквідації аварій;
- декларування безпеки об’єктів підвищеної небезпеки;
- створення, експлуатація й технічне обслуговування автоматизованих систем раннього виявлення загрози виникнення надзвичайних ситуацій та оповіщення населення у разі їх виникнення;

- створення та утримання в робочому стані засобів зв’язку, аварійно-рятувальної техніки та обладнання і використання їх за призначенням;
- аварійно-рятувальне обслуговування небезпечних об’єктів;
- створення об’єктового матеріального резерву для запобігання та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій і проведення невідкладних відновлювальних робіт;
- здійснення власним коштом заходів, що знижують рівень ризику виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру;
- розроблення заходів щодо забезпечення техногенної безпеки з урахуванням досягнень науки і техніки, позитивного досвіду із зазначеного питання;
- фінансування витрат у порядку й обсягах, потрібних для повного та якісного забезпечення вимог техногенної безпеки;
- виконання інших завдань і заходів техногенної безпеки з урахуванням вимог чинного законодавства України.

# ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Сучасний стан виробництва графітових електродів характеризується високим рівнем технологічної досконалості, автоматизації та орієнтацією на потреби електросталеплавильного виробництва. Зокрема графітові електроди застосовуються в дугових сталеплавильних печах під час виплавки сталі, де вони забезпечують стабільне горіння електричної дуги та ефективну передачу електричної енергії до металевої шихти, а також в печах для виробництва феросплавів (руднотермічні печі), що потребують високих температур і значних струмових навантажень.

Вибір марки графітових електродів залежить від потужності трансформатора печі, діаметра електрода, технології плавки, режиму роботи та вимог до стійкості й питомої витрати електродів.

Основними марками графітованих електродів для електропечей є RP (Regular Power), HP (High Power), UHP (Ultra High Power) та SH (Super High Power).

Цінова політика на графітові електроди дуже залежить від їх типу, діаметра та якості матеріалу, а також від ринкових умов і постачальника і може бути в межах від $2 200 до $3 300 за тонну.

2. Електроди для зварювання застосовуються в металургійній галузі для виконання монтажних і ремонтних робіт, з’єднання металевих конструкцій, відновлення зношених деталей та наплавлення захисних шарів з метою підвищення зносостійкості й продовження терміну служби обладнання.

В основному їх застосовують таких марок, як УОНИ-13/55, АНО-4, АНО-21, МР-3, а також спеціалізовані електроди для наплавлення та зварювання легованих і високолегованих сталей залежно від умов експлуатації та вимог до міцності зварного з’єднання.

3. ПрАТ «Укрграфіт» відіграє стратегічно важливу роль у розвитку вітчизняної металургійної галузі як провідний український виробник графітових електродів для дугових сталеплавильних печей.

4. Провідними світовими виробниками графітових електродів є GrafTech International, SGL Carbon, Showa Denko, Fangda Carbon, Graphite India, Tokai Carbon, Jilin Carbon та інші, які формують конкурентне середовище та визначають технологічні тенденції галузі виробництва електродів.

5. Для підвищення стійкості електродів застосовуються різні методи:

– правильний вибір матеріалу (використання спеціалізованих електродів, розроблених для конкретних умов (наприклад, жаростійкі компоненти, мідь з домішками для точкового зварювання));

– термічна обробка та сушіння (зварювальні електроди чутливі до вологи. Їхнє попереднє просушування в печі при рекомендованій температурі (наприклад, 70–150°C) значно покращує їхні характеристики та запобігає проблемам, як-от прилипання);

– оптимізація параметрів процесу (дотримання рекомендованих виробником діапазонів струму та напруги);

– захист від зовнішнього впливу (використання захисних газів під час зварювання або зберігання електродів у сухих умовах).

6. Подальший розвиток виробництва графітових електродів визначатиметься інноваційністю технологічних рішень, ресурсною ефективністю та відповідністю сучасним екологічним вимогам.

# ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Існуючі види електродів, їх класифікації і характеристики. URL: https://zvarka.info/isnuyuchi-vidi-elektrodiv-yix-klasifikaciyi-i-xarakteristiki/ (дата звернення: 05.12.2025).

2. Усе про маркіровку електродів. URL: https://zvarka.info/use-pro-markirovku-elektrodiv/ (дата звернення: 05.12.2025).

3. Як вибрати електрод для зварювання. URL: https://lioninvest.com.ua/yak-vybraty-elektrod-dlia-zvariuvannia/?srsltid=AfmBOor_mbWl0sc_sLV9NfmZjyuGrYP6fo9YuJWTEQ41xuxDpjaVJnHp (дата звернення: 05.12.2025).

4. Види електродів та їх застосування. URL: https://argon.in.ua/vydy-elektrodiv-ta-yikh-zastosuvannia/?srsltid=AfmBOoqfJPypYICkD-phNi3QQGmlEPMMFKp0n4CpEiTSI9pqfbP-5Tj0 (дата звернення: 05.12.2025).

5. Електроди. Загальні відомості. URL: https://basok.com.ua/ua/a308203-elektrody-obschie-svedeniya.html (дата звернення: 05.12.2025).

6. Що таке графітові електроди для електродугових печей ? URL: https://jinsuncarbon.com/uk/%D1%89%D0%BE-%D1%82%D0%B0%D0%BA%D0%B5-%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D1%96%D1%82%D0%BE%D0%B2%D1%96-%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B8-%D0%B4%D0%BB%D1%8F-%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 05.12.2025).

7. Воденніков С.А, Тарасов В. К., Воденнікова О. С. Конструкції агрегатів чорної металургії: навч. посібн. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 192 с. ISBN 978-966-8462-69-6

8. Воденніков С.А., Галицький Ю.П., Воденнікова О.С. Теорія та технологія електросталеплавильного виробництва : навч. посібн. Запоріжжя

:ЗДІА, 2010. 246 с.

9. Козлов Г. О. Руднотермічні печі : навч. посібн. для самостійної роботи студентів спеціальності: 5.090409.01 «Електрометалургія сталі і феросплавів» з дисципліни: «Конструкція електрометалургійних агрегатів». Нікополь : НТ НМетАУ, 2025. 23 С. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/923978/mod_resource/content/1/kema_rpz.pdf

10. Для чого використовується нафтовий кокс? URL: https://jinsuncarbon.com/uk/%D0%B4%D0%BB%D1%8F-%D1%87%D0%BE%D0%B3%D0%BE-%D0%B2%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%BE%D0%B2%D1%83%D1%94%D1%82%D1%8C%D1%81%D1%8F-%D0%BD%D0%B0%D1%84%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9-%D0%BA/ (дата звернення: 05.12.2025).

11. Кам’яновугільний пек. URL: https://tata.ua/%D0%BA%D0%B0%D0%BC%D1%8F%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D1%83%D0%B3%D1%96%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B8%D0%B9-%D0%BF%D0%B5%D0%BA/ (дата звернення: 02.12.2025).

12. Процес виготовлення графітових електродів. URL: https://jinsuncarbon.com/uk/%d0%bf%d1%80%d0%be%d1%86%d0%b5%d1%81-%d0%b2%d0%b8%d1%80%d0%be%d0%b1%d0%bd%d0%b8%d1%86%d1%82%d0%b2%d0%b0-%d1%82%d0%b0-%d0%b2%d0%b8%d0%ba%d0%be%d1%80%d0%b8%d1%81%d1%82%d0%b0%d0%bd%d0%bd%d1%8f-%d0%b3/ (дата звернення: 02.12.2025).

13. Техніка зварювання з використанням різних типів електродів: Практичні поради та методики. URL: https://argon.in.ua/tekhnika-zvariuvannia-z-vykorystanniam-riznykh-typiv-elektrodiv-praktychni-porady-ta-metodyky/?srsltid=AfmBOooD78DVmrfSqPdRC6Qfxbw_W3W5_sENM2fSEK9Cau8gBc6hq1sc (дата звернення: 02.12.2025).

14. Застосування графітованих гнотових електродів на дугових

сталеплавильних печах постійного струму / О. Г. Богаченко, Д. Д. Міщенко, І. О. Гончаров та ін. *Сучасна електрометалургія*. 2023. №1. С. 53-61. https://doi.org/10.37434/sem2023.01.07

15. Застосування графітованих гнотових електродів на 50-тонній дуговій сталеплавильній печі змінного струму типу ДСВ-50/ О. Г. Богаченко, А. В. Черняков, І. О. Гончаров та ін. *Сучасна електрометалургія*. 2024. №1. С. 32-39. https://doi.org/10.37434/sem2024.01.04

16. Про підвищення надійності роботи електродів дугових сталеплавильних печей / М. В. Коваль, В. К. Тарасов, С. С. Пилипенко та ін. *Металургія*. 2016. Вип. 1. С. 58–62.

17. Електроди графітовані. URL: https://ukrgrafit.com.ua/products/elektrody-grafitirovannye/ (дата звернення: 05.12.2025).

18. Графітовий електрод Виробник в Китаї. URL: https://jinsuncarbon.com/uk/ (дата звернення: 05.12.2025).

19. Вугільний електрод. URL: https://jinsuncarbon.com/uk/%d0%bf%d1%80%d0%be%d0%b4%d1%83%d0%ba%d1%82/%d0%b2%d1%83%d0%b3%d1%96%d0%bb%d1%8c%d0%bd%d0%b8%d0%b9-%d0%b5%d0%bb%d0%b5%d0%ba%d1%82%d1%80%d0%be%d0%b4/ (дата звернення: 12.12.2025).

20. Daniel Steppich. Graphite Electrodes for Electric Arc Furnaces. In book: Industrial Carbon and Graphite Materials. 2021. Vol. 1. pp. 281-319. https://doi.org/10.1002/9783527674046.ch6_5_3

21. Воденнікова О. С., Воденніков С. А., Дубасов Ю. О. Шляхи підвищення стійкості електродів. *Наука і металургія* : Всеукраїнська науково-технічна конференція : збірник тез (Дніпро, 19–20 листопада 2025р.). Дніпро : -, 2025. С. 33.

22. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник. 5-те вид., доповн. Київ : Знання, 2014. 373 с.

23. Сєріков Я. О. Основи охорони праці : навч. посібн. для студентів

вищих закладів освіти. Харків : ХНАМГ, 2007. 227 с.

24. Засоби індивідуального захисту: типи, вимоги, рекомендації : навч. посібник / В.І. Голінько. С.І. Чеберячко, О.В. Дерюгін, Ю.І Чеберячко, Д.І. Радчук. – Дніпро : , 2021. 95 с.

25. Техногенна безпека на небезпечних об’єктах. URL: https://ohoronapraci.kiev.ua/article/news/tehnogenna-bezpeka-na-nebezpecnih-obektah дата звернення: 05.12.2025).

26. Організація забезпечення техногенної безпеки підприємств. URL: https://lviv.dsp.gov.ua/orhanizatsiia-zabezpechennia-tekhnohenno/756/ (дата звернення: 14.12.2025).

# ДАДАТКИ

## ДОДАТОК А
## ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ**

**Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України (ІЧМ НАН України)**
**Український державний університет науки і технологій МОН України**
**Дніпровський державний технічний університет МОН України**

**Збірник тез**

**ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ**

**«НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ»**



**DOI: 10.52150/2522-9117-2025-conferens**

**19-20 листопада 2025**
**м. Дніпро**

5

ЗМІСТ

С.

## Металургія чавуну та сталі: технології, інновації, якість

**Нестеров О. С., Гармаш Л. І., Лопатенко К. П., Болденко М. Г., Чайка О. Л., Щербачов В. Р.** Вплив водню на процеси розм'якшення та плавлення окатишів в доменній печі ... 9

**Нестеров О. С., Гармаш Л. І., Лопатенко К. П., Болденко М. Г., Корнілов Б. В., Вішняков В. І.** Збагачення відновного газу воднем та його вплив на процеси розм'якшення-плавлення агломерату в доменній печі ... 10

**Чайка О. Л., Корнілов Б. В., Москалина А. О., Муравйова І. Г., Гармаш Л. І., Іванча М. Г., Ізюмський М. М.** Перспективи використання водню в умовах роботи ДП №3 ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ» ... 11

**Голуб Т. С., Молчанов Л. С.** Фізико-хімічний аналіз можливості та доцільності термічного розкладання оксидів заліза ... 13

**Голуб Т. С., Молчанов Л. С., Мінай О. М.** Фізичне та чисельне дослідження газодинамічних властивостей струменів, що формуються складеними соплами під час верхньої продувки ... 14

**Молчанов Л. С., Чернятевич А. Г.** Розробка та дослідження заходів щодо підвищення енергоефективності конвертерної плавки в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» ... 15

**Молчанов Л. С., Чернятевич А. Г., Голуб Т. С., Какушкін Є. С.** Співставлення результатів низькотемпературного та високотемпературного моделювання верхньої продувки двофазної рідкої системи з використанням однакової продувної фурми ... 16

**Семпкін С. І., Голуб Т.С., С. О. Дудченко, Вакульчук В. В.** Стендові дослідження активованого електричним розрядом кисневого газового струменя, що витікає з верхньої продувної фурми ... 17

**Чернятевич А. Г., Похвалітний А. А., Кондрашенков Д. С.** Дослідження процесу попереднього підігріву металевого брухту пиловугільним паливом у кисневому конвертері ... 18

**Семенов Ю. С.** Дослідження впливу стабільності теплового стану доменної печі на техніко-економічні показники плавки ... 19

**Лебідь В. В.** Удосконалення способів оцінки розподілу шихти при її завантаженні у піч лотковим безконусним пристроєм ... 20

**Похвалітний А. А., Сігарьов Є. М., Круть А. В., Герасименко П. Л.** Результати експлуатації модернізованих наконечників кисневих фурм ... 21

**Похвалітний А. А., Чубіна О. А., Вовк А. О.** Аналіз формування газорідинного потоку у випускному каналі кисневого конвертера ... 22

**Губарєва А. І., Кошляк І. М., Руденко Р. М., Сігарьов Є. М., Руденко М. Р.** Удосконалення процесу запалювання агломераційної шихти шляхом розробки блокового пальника з роздільною подачею повітря. 23

**Крячко Г. Ю., Сігарьов Є. М., Руденко М. Р., Холодний С. А.** Вплив інтенсивності доменної плавки на формування структури і радіальний газорозподіл стовпа шихти ... 24

**Мізіна І. В., Абдулкін Р. С., Руденко Р. М., Сігарьов Є. М., Руденко М. Р.** Аналіз впливу схеми укладання на рівномірність хімічного складу залізорудного штабеля ... 25

**Руденко Р. М., Сігарьов Є. М., Руденко М. Р., Кашеєв М. А., Чубіна О. А.** Моделювання процесу усереднення хімічного складу залізорудної шихти при формуванні штабеля ... 26

**Сігарьов Є. М., Семірягін С. В., Похвалітний А. А., Кондрашенков Д. С.** Обгрунтування умов отримання феронікелю з вторинної сировини ... 27

**Воденнікова О. С., Воденніков С. А., Іванніков С. В.** Використання штучного інтелекту в металургійній галузі ... 28

**Воденнікова О. С., Воденніков С. А., Борсук С.А.** Використання штучного інтелекту в освітньому процесі за спеціальністю G10 «Металургія» ... 29

**Воденнікова О. С., Воденніков С. А., Карамзіна А.С.** Сучасні аспекти використання плавленого вапна в металургійній промисловості України ... 30

**Воденнікова О. С., Воденніков С. А.** Промислове випробування ТШС із плавленим вапном у мартенівському цеху ПАТ «Запоріжсталь» ... 31

**Григор'єв С.М., Яковлєв Д.В.** Методологія розрахунку економічної доцільності інноваційного розвитку виробництва губчастого феровольфраму у вітчизняній металургії ... 32

## Електрометалургія

**Воденнікова О. С., Воденніков С. А., Дубасов Ю.О.** Шляхи підвищення стійкості електродів ... 33

УДК 669.187.2.036.61

# ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРОДІВ

**О. С. Воденнікова[1] к.т.н., доц., С. А. Воденніков д.т.н., проф., Дубасов Ю.О.[1]**

**[1]Запорізький національний університет, м. Запоріжжя**
**[2]Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя**

Властивості електродів в значній мірі визначаються властивостями шлаку, одержуваного з шлакоутворюючій основи покриття електродів. При цьому електрод повинен забезпечувати:

– легке запалення і стійке горіння зварювальної дуги;

– рівномірне розплавлення покриття електрода;

– рівномірне покриття шва шлаком і легке його видалення після зварювання;

– відсутність в металі шва тріщин, пор, непроварів.

Основними характеристики електродів є механічні властивості шва і зварного з'єднання: тимчасовий опір розриву; відносне подовження, ударна в'язкість; кут вигину.

Стійкість електродів залежить від багатьох факторів:

1. Матеріалу електрода.

Вирішальне значення має вибір матеріалу електрода (мідь, вольфрам, графіт, різні сплави): наприклад, вольфрамові електроди для TIG-зварювання, є неплавкими і мають високу термічну стійкість, а металеві зварювальні електроди плавляться в процесі роботи.

2. Умов експлуатації:

– високі температури можуть призвести до окислення, деформації або випаровування матеріалу електрода;

– вплив корозійних речовин (кислот, лугів, солей) або вологи може швидко погіршити стан електрода, особливо його покриття;

– сила струму, напруга та полярність можуть впливати на швидкість зносу або ерозії електрода.

3. Конструкції та якості виготовлення.

Однорідність матеріалу, якість покриття (для зварювальних електродів) та правильна геометрія кінчика впливають на стабільність процесу та термін служби.

4. Технологічного процесу.

Умови зварювання (наприклад, товщина матеріалу, положення шва) або параметри електролізу також відіграють роль.

Для підвищення стійкості електродів застосовуються різні методи:

– правильний вибір матеріалу (використання спеціалізованих електродів, розроблених для конкретних умов (наприклад, жаростійкі компоненти, мідь з домішками для точкового зварювання));

– термічна обробка та сушіння (зварювальні електроди чутливі до вологи. Їхнє попереднє просушування в печі при рекомендованій температурі (наприклад, 70–150°C) значно покращує їхні характеристики та запобігає проблемам, як-от прилипання);

– оптимізація параметрів процесу (дотримання рекомендованих виробником діапазонів струму та напруги);

– захист від зовнішнього впливу (використання захисних газів під час зварювання або зберігання електродів у сухих умовах).

Стійкість електродів до сталі залежить від їх маркування:

– для легованих сталей використовують електроди з маркуванням «Е» та цифровими позначеннями, що вказують на міцність (наприклад, 38, 42, 46, 50, 55, 60, 70, 85, 100, 125, 150). Літера «А» після цифри (наприклад, 42А, 46А, 50А) означає, що зварний шов матиме підвищену пластичність та ударну в'язкість.

– для термостійких сталей використовують електроди з умовними позначеннями Е-09 та Е-10 (далі можуть йти додаткові індекси, як-от М, МХ).