

**ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ СТАЛІ**  
методичні вказівки  
до практичних занять. Частина 1



УДК 669:621.7 (072)  
Е46

Рекомендовано Науково-методичною радою  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
(протокол № 1 від 27.09.2024 р.)

**Укладач:**

Доброносів Ю.К., канд. техн. наук, доцент,  
Синегін Є.В., канд. техн. наук, доцент

Е46      **Електрометалургія** сталі: методичні вказівки до практичних занять.  
Частина 1 / уклад.: Ю. К. Доброносів, Є. В. Синегін. Запоріжжя :  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2024. 29 с.

Методичні вказівки до практичних занять рекомендовані до використання під час викладання обов'язкового освітнього компонента «Електрометалургія сталі» за освітньо-професійною програмою «Металургія чорних металів», спеціальність 136 Металургія.

УДК 669:621.7 (072)

©ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2024



## ЗМІСТ

ВСТУП	4
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 1. Загальна характеристика печей електросталеплавильного виробництва	5
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 2. Розрахунок робочого простору ДСП	9
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 3. Розрахунок площі спікання та кількості агломераційних машин	12
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 4. Електрична дуга	21
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 5. Визначення потужності пічного трансформатора	22
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 6. Вибір типу та визначення розмірів електрода	25
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	28



## ВСТУП

Електрометалургія сталі – один з базових курсів підготовки сучасних металургів, який дозволить набути знання та отримати професійні компетенції пов'язані з технологією електровиплавки сталі, влаштуванням та конструкцією електричних печей, електричним та механічним обладнанням, електричній та тепловій роботі печей, знанням про фізико-хімічні процеси, що протікають при плавці сталі в електричних печах.

Під час виконання практичних занять здобувач вищої освіти має можливість відпрацювати такі навички: розуміння принципів електролізу, електричних дуг та їх впливу на процеси розплавлення металів; моніторинг та контроль параметрів виробництва сталі, таких як температура, склади газів та електричний струм; ознайомлення з конструкцією та експлуатацією електропечей, включаючи індукційні та дугові печі; ознайомлення з нормами техніки безпеки в електрометалургії, що є критично важливим під час роботи з високими температурами та електричними струмами; розуміння екологічних наслідків процесів електрометалургії та розробка стратегій зменшення впливу на навколишнє середовище.

Робота на практичному занятті будується за принципом розбору запропонованого кейсу та виконується безпосередньо під час заняття. Оцінка за роботу на практичному занятті: оголошується наприкінці заняття і може бути оскаржена одразу ж; враховується повнота і правильність відповіді, оцінка ініціативності у роботі над проблемою, здатності комунікувати у команді та під впливом негативних факторів, в т.ч. під тиском викладача та/або групи, вміння вести дискусію. Оцінки, отримані за роботу на практичних заняттях, не можуть бути відпрацьовані або покращені, окрім процедури оскарження.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 1

### Загальна характеристика печей електросталеплавильного виробництва

**Мета роботи** – закріпити теоретичні знання з призначення та конструкцій металургійних печей різних типів.

#### Питання для обговорення на занятті:

1. Які дві стадії сталеплавильного процесу протікають у сталеплавильних агрегатах?
2. Які печі є основними у сталеплавильному виробництві?
3. Охарактеризуйте традиційний процес виробництва сталі у електропічах.
4. Як змінилась роль електродугових печей у виробництві сталі з появою позапічної обробки.
5. Поясніть структуру електросталеплавильного виробництва у складі міні-заводу (рис. 1.1).

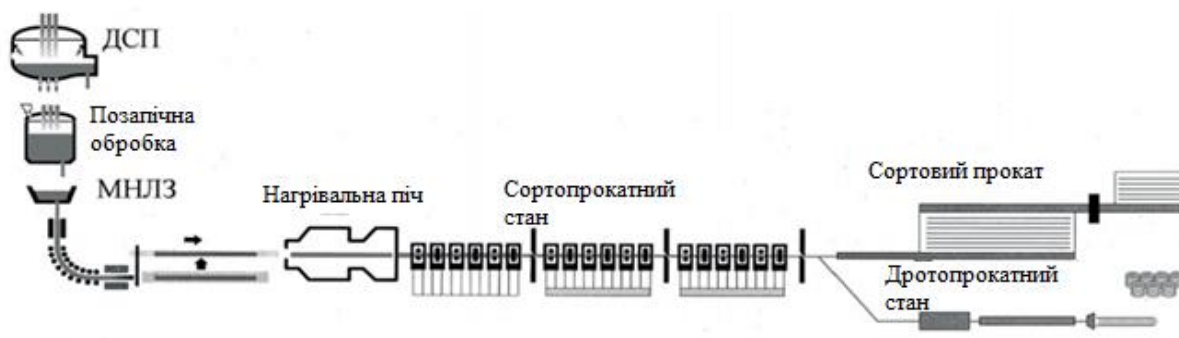


Рисунок 1.1 – Структура електросталеплавильного виробництва у складі міні-заводу

6. У чому перевага дугових печей перед іншими сталеплавильними агрегатами?
7. У чому полягає принцип роботи ДСП (рис. 1.2)?
8. Що таке дугові печі прямої та непрямої дії?
9. За якими ознаками і як класифікують ДСП?
10. У чому полягає сутність переплавних процесів сталі?
11. Поясніть принцип роботи і конструкцію індукційних печей з осердям та з тиглем (рис. 1.3).

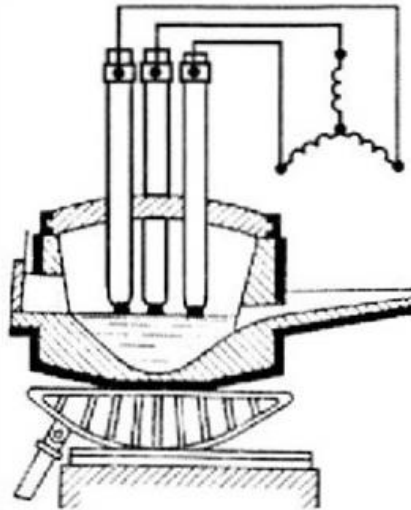


Рисунок 1.2 – Трьохфазна ДСП

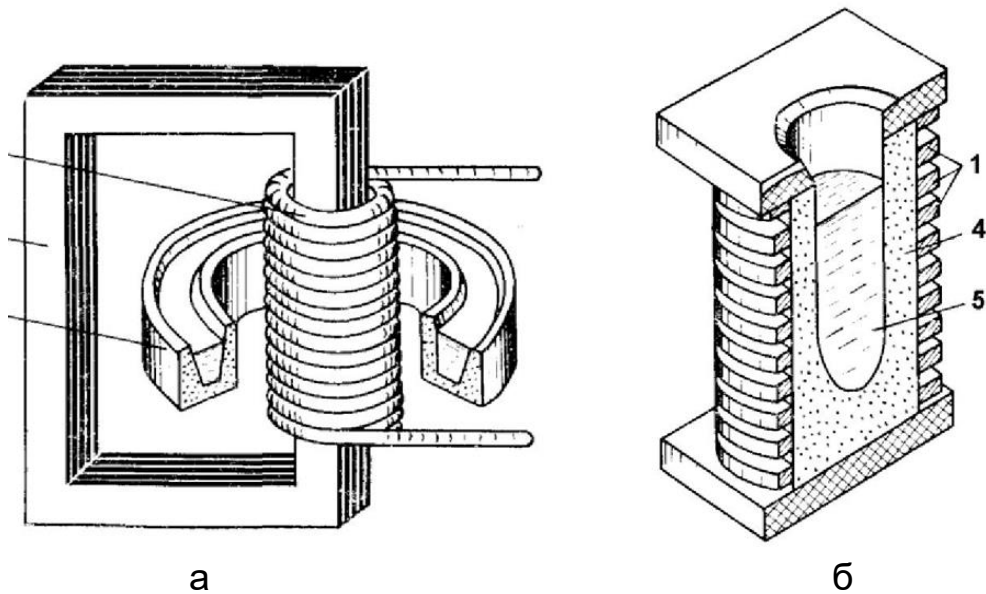


Рисунок 1.3 – Індукційні печі з осердям (а) та тиглем (б)

12. Навіщо проводять обробку сталі у вакуумі?
13. Що таке плазмова дуга і як вона утворюється?
14. На чому заснований принцип роботи електропечей опорю?
15. Поясніть сутність процесу електрошлакового переплаву
16. У чому полягає принцип електронно-променевого переплаву?

## ВПРАВИ:

1. Вивчіть та поясніть принцип роботи і конструкцію вакуумно-дугових печей з витратним і невитратним електродом (рис. 1.4.)
2. Вивчіть та поясніть принцип роботи і конструкцію плазмових печей з керамічним тиглем та з кристалізатором (рис. 1.5)
3. Вивчіть та поясніть та конструкцію печі для електрошлакового переплаву (рис.1.6).

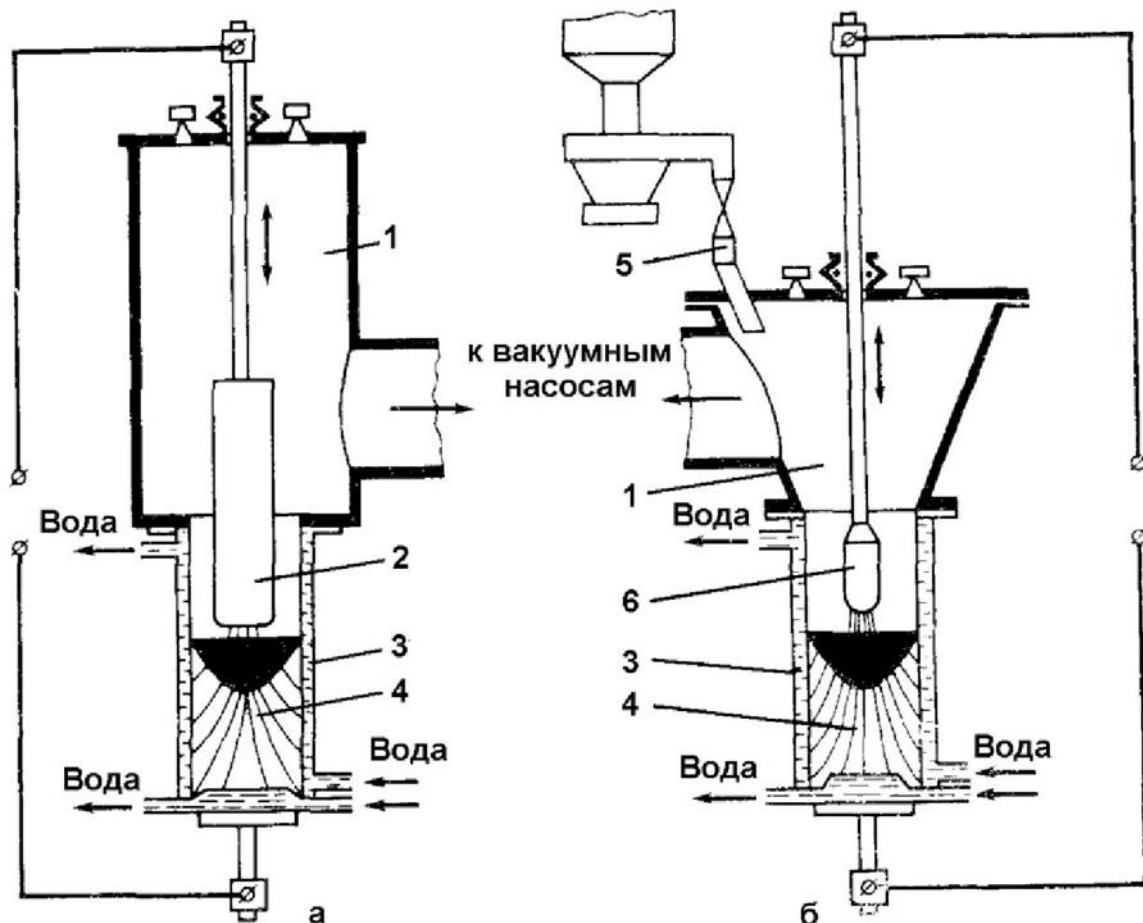


Рисунок 1.4 - Схеми вакуумно-дугових печей з витратним і невитратним електродом

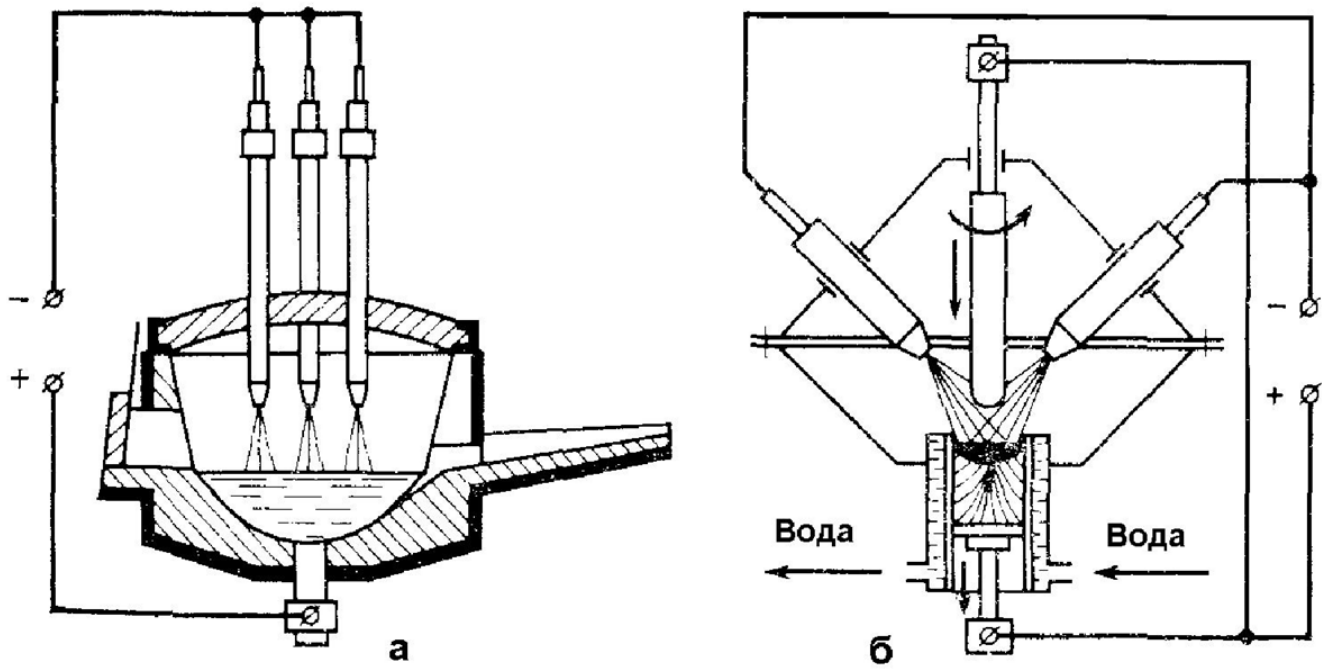


Рисунок 1.5 - Схеми плазмових печей з керамічним тіглем та з кристалізатором

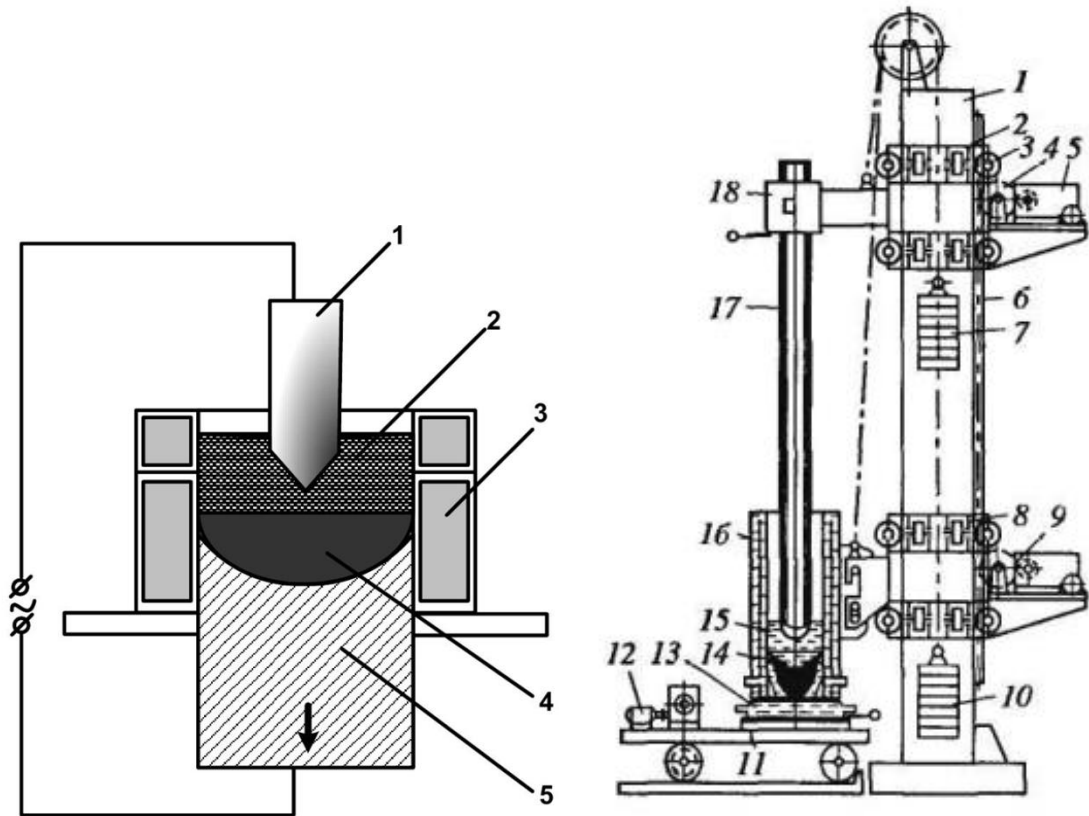


Рисунок 1.6 - Печі для електрошлакового переплаву

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 2

### Розрахунок робочого простору ДСП

**Мета роботи** - отримати знання і навички з розрахунків параметрів робочого простору ДСП

#### Теоретичні відомості:

Робочий простір електродугової печі, в більшості випадків, представляє усічений конус, звернений донизу меншою основою, до якої додано кульовий сегмент з ухилом конічної частини до горизонту  $45^\circ$ . Така форма забезпечує прискорене розплавлення шихти та якісне заправлення футерування в процесі експлуатації. Схему робочого простору наведено на рис. 2.1.

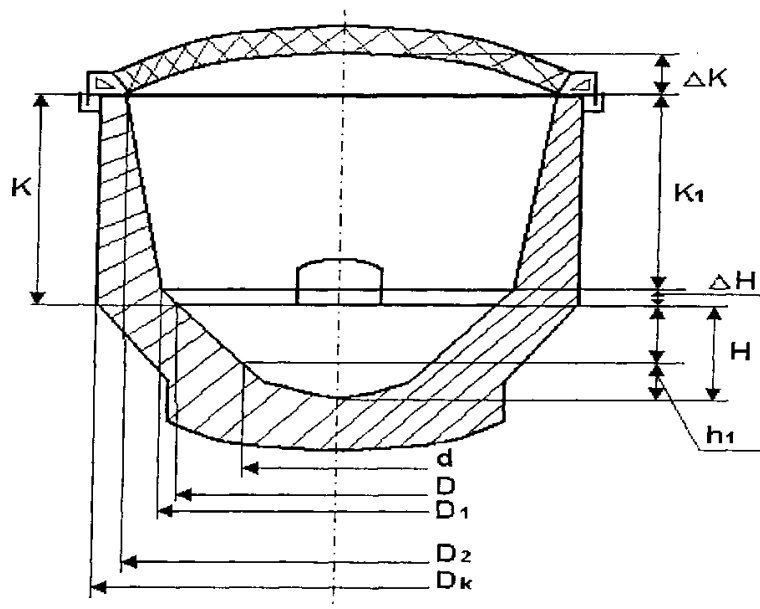


Рисунок 2.1 – Схема робочого простору ДСП

1. Розрахунок об'єму рідкого металу виконаємо по залежності:

$$V = Q/\rho_M$$

де  $Q$  – ємність печі, т;  $\rho_M$  - щільність рідкої сталі ( $6.9 - 7.2 \text{ т/м}^3$ )

2. Визначення об'єму рідкого шлаку. Для технологічного процесу ведення плавки кількість рідкого шлаку становить 8-15% від об'єму металу:



$$V_{ш} = (0,08...0,15) V$$

3. Визначення об'єму ванни до порога робочого вікна:

$$V_{п} = V_{ш} + V$$

4. Визначення діаметра ванни на рівні порога завалочного вікна. Форма ванни приймається сфероконічною з нахилом укосів ванни  $45^\circ$ . За таких умов співвідношення між об'ємом та діаметром поверхні ванни визначається рівнянням:

$$D = \sqrt[3]{\frac{V_{п}}{0,0968}}; \text{ м}$$

5. Глибину ванни можна знайти через діаметр її поверхні по залежності:

$$H = 0,2D$$

6. Визначення висоти сферичної ( $h_1$ ) та конічної ( $h_2$ ) частин ванни. Прийнято на печах, що діють, ці параметри визначати в залежності від глибини ванни:

$$h_1 = 0,2H ; h_2 = 0,8H$$


7. Визначення діаметра сферичної частини ванни. Можна визначити графічно, з кута нахилу  $45^\circ$ . Тотожно можна визначити за залежністю:

$$d = D - 2h_2$$

8. Перевищення рівня укосів над рівнем порога вікна завалки. Перевищення рівня укосів над рівнем порога вікна завалки ( $\Delta H$ ) визначають із співвідношення:

$$\Delta H = 0,12H$$

9. Визначення висоти вільного простору печі. Величину цього параметра можна визначити за рівнянням:


$$k = 0,75Q^{0,25}; \text{ м}$$

10. Визначення висоти конічної частини стін печі. Висоту конічної частини стін печі визначаємо за такою формулою:

$$k_1 = k - \Delta H$$

11. Визначення діаметра робочого простору на рівні верху укосів. Діаметра робочого простору на рівні верху укосів визначаємо з виразу:

$$D_1 = D + 2 \Delta H$$

12. Визначення діаметра робочого простору на рівні п'яти склепіння. Діаметр робочого простору на рівні п'яти склепіння визначаємо за формулою:

$$D_2 = D_1 + 2k_1 \operatorname{tg} \alpha$$

де  $\alpha$  - кут нахилу до вертикалі стін печі.  $\alpha = 15^\circ$ .

13. Визначення висоти стріли склепіння. Для магнезитохромітового склепіння висота стріли склепіння:

$$\Delta k = 0,12D_2$$

14. Визначення діаметра кожуха печі на рівні верху робочого простору. Діаметр кожуха печі на рівні верху робочого простору визначаємо за формулою:

$$D_k = D_2 + 0,2 \Delta D_2$$

де  $\Delta D_2$  - товщина футерівки стін на тому ж рівні.

**ВПРАВА:** розрахувати параметри робочого простору для печі ємністю 50т.

### ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 3

#### Розрахунки механічного обладнання ДСП

**Мета роботи** - отримати знання і навички з розрахунків вузлів та механізмів ДСП .

#### Теоретичні відомості:

*Розрахунок механізму підйому склепіння.* Склепіння печі піднімається перед поворотом напівпорталу зі склепінням або перед поворотом корпусу печі. Перша операція пов'язана із завантаженням печі зверху, друга — з періодом розплавлювання. Механізм підйому склепіння (рис. 3.1) складається із двох приводів, зв'язаних трансмісійним валом 7. Склепіння 6 підвішене у чотирьох точках на ланцюгах 4, що обгинають гладкі ролики 5. Тяги 3 з'єднані з однієї сторони з ланцюгами, а з іншого боку - з гвинтом 1, гайка якого обертається від черв'ячної пари (редуктора) 2.

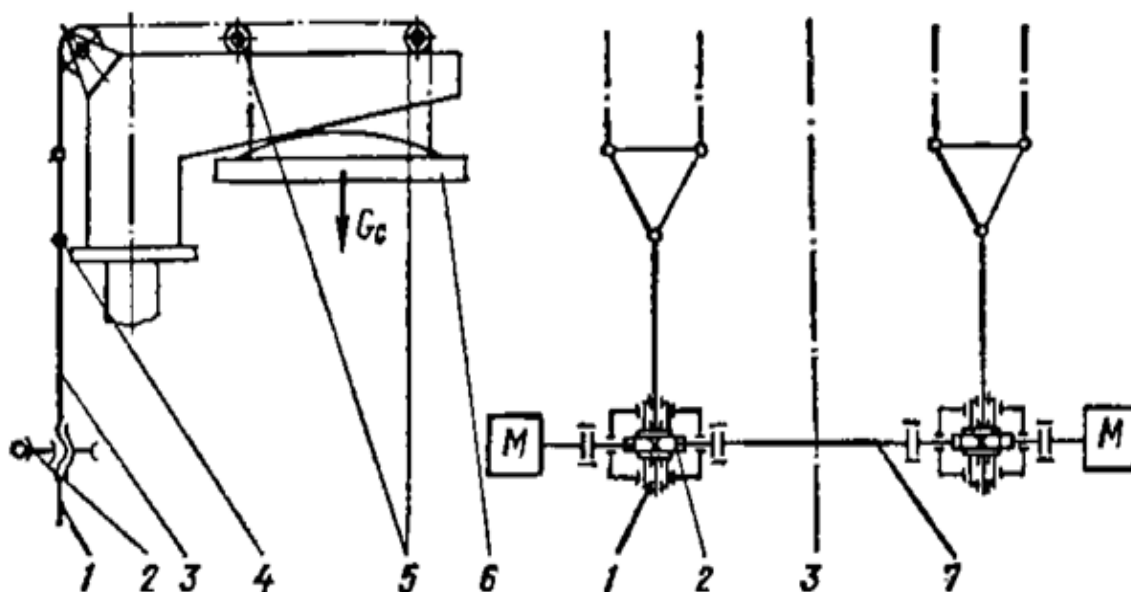


Рисунок 3.1 – Розрахунково-кінематична схема ланцюгового механізму підйому склепіння

Приводи підйому склепіння долають вагу склепіння, що передається ланцюгами 4 на гвинти 1 та сили тертя у опорах роликів 5, якими в першому наближенні можна знехтувати. Двигуни працюють в короткочасному режимі, тому вибір електродвигуна роблять по статичному моменті на одному гвинті, кН м:



$$M_{ст} = 0,5 G_{сг} r_{ср} \operatorname{tg} (\alpha + \rho)$$

де  $G_c$  — вага склепіння ;  $r_{ср}$  — середній радіус різьби гвинта 1;  
 $\alpha, \rho$  — кути відповідно підйому гвинтової лінії й тертя.

Значення кута тертя  $\rho$  для пари тертя сталь-бронза складає  $5.7^\circ$ ,  
кут  $\alpha = \operatorname{arctg} (s / 2\pi r_{ср})$ , де  $s$ - крок різьби гвинта .

Радіус гвинта визначають з умови міцності на розтягіння:

$$r = \sqrt{\frac{0,5 G_c}{\pi [\sigma]}}$$

де  $[\sigma]$  – допустиме напруження гвинта на розтягіння, 130-140 МПа.

По знайденому радіусу задаються стандартною величиною різьби гвинта. Потужність одного електродвигуна, кВт:

$$N = M_{ст} \omega / \eta$$

де  $\omega$  — кутова швидкість обертанні гвинта,  $\text{с}^{-1}$ ,

$\eta$  — к.к.д. передачі (для черв'ячної передачі  $\eta = 0,65-0,7$ ),

$\omega = 2\pi r_{ср} V/s$ , де  $V$  – швидкість підйому склепіння.

*Механізм повороту склепіння.* Поворот склепіння виробляється разом з напівпорталом для відкриття робочого простору печі перед завантаженням шихти. Напівпортал 3 (рис.3.2) із плитою фіксується в підшипниках 1 і скріплений із зубчастим сектором 2. Останній перебуває в зачепленні із ведучою конічною шестірнею 4, що приводиться в обертання від електродвигуна через редуктор 5.

Опорні підшипники сприймають навантаження від ваги напівпорталу, склепіння з футеровкою, електродів і механізмів, що перебувають на напівпорталі. Тому спочатку визначають положення центрів ваги окремих елементів, потім загальні координати центра ваги системи вагою  $Q_0$ .

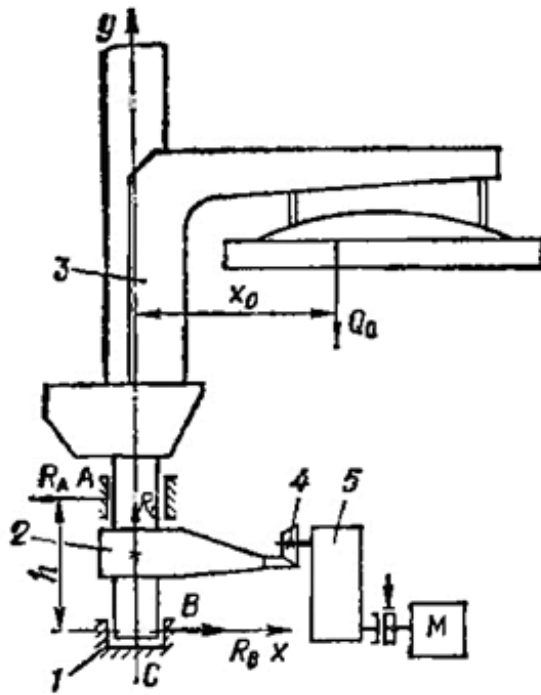


Рисунок 3.2 – Розрахунково-кінематична схема механізму повороту склепіння

Вертикальна реакція в під'ятнику С:

$$R_C = Q_0.$$

Горизонтальна реакція в радіальних підшипниках А:

$$R_A = R_B = Q_0 x_0 / h$$

де  $x_0$  — відстань від центра ваги системи до осі повороту;  
 $h$  - відстань між осями підшипникових опор.

Статичний момент від сил тертя в опорах підшипників:

$$M_{ст} = 0,5 R_{A(B)} f_1 (d_A + d_B) + 0.5 R_C d_C f_2$$

де  $d_A, d_B, d_C$  — відповідно діаметри цапф опор А, В, С;  
 $f_1, f_2$  - коефіцієнти тертя в радіальному й упорному підшипниках.

Потужність двигуна:

$$N = M \omega / \eta_n$$

де  $\eta_n$  — к.к.д. зубчастої передачі та редуктора механізму. (для зубчастої передачі  $\eta = 0,95$ , для редуктора  $0,9 - 0,95$ ),  
 $\omega$  — кутова швидкість двигуна, с<sup>-1</sup>,  
 $\omega = \pi / 2t$ , де  $t$  — час повороту склепіння.

Під час пуску й гальмування діє динамічний момент, який варто враховувати при визначенні потужності привода.

*Механізм нахилу ДСП.* Механізм нахилу печі призначений для нахилу печі у бік носика для зливання металу та у бік робочого вікна для зливання шлаку. Механізм нахилу печі може бути з гідравлічним або електромеханічним (рис.3.3) приводами .

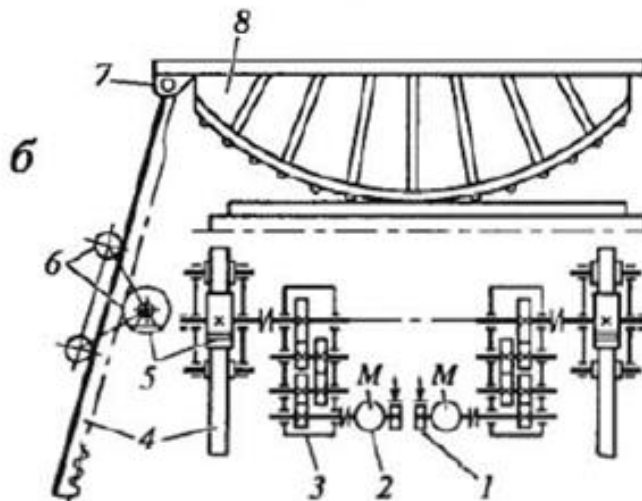


Рисунок 3.3 – Електромеханічний механізм нахилу ДСП

У цьому механізмі (див. рис.3.3) рейки мають окремий привід, установлюваний на фундаменті під піччю з боку робочого вікна. У кожному приводі обертання від електродвигуна 2 через зубчасту муфту передається триступінчастому редуктору 3, з'єднаному зубчастою муфтою з валом рейкової шестірні 5, що входить у зачеплення з рейкою 4. Остання з'єднана шарніром 7 із сектором колиски 8. При нахилі печі рейки одержують складний рух: поступальний — від приводних шестірень і хитальний — навколо осі цих шестірень — у результаті переміщення колиски. Необхідне притиснення рейки до шестірні

здійснюється за допомогою хитної притискної обойми 6. Вал рейкової шестірні опирається на два підшипникових вузли 8. Привід оснащений гальмом 1, із включенням якого автоматично відключається електродвигун.

Розрахунок перекидних моментів електросталеплавильної печі виконується по відомих методах. Для визначення загальних координат центра ваги порожньої печі знаходять координати центрів ваги окремих її вузлів і елементів: циліндричної й нижньої частин корпусу з футеровкою, зливального носка, арматури робочого вікна з механізмами, піщого затвора, порталу, механізму переміщення електродів і склепіння, механізму підйому склепіння, коліски та інших елементів.

При відомих координатах центра ваги порожньої печі  $x_0 = e$  і  $y_0 = c$  відносно осі обертання  $O_1$  (рис. 3.4) визначають радіус-вектор:

$$r_0 = \sqrt{e^2 + b^2}$$

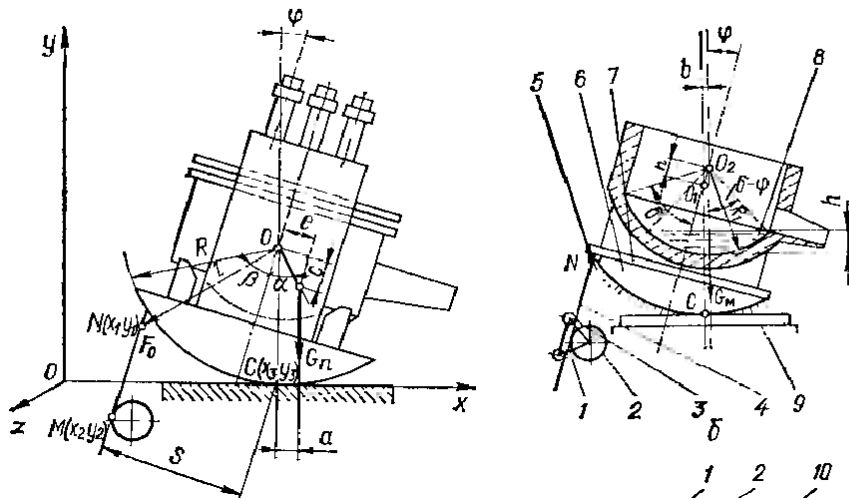



Рисунок 3.4 – Розрахункова схема механізму нахилу ДСП

Кут  $\alpha$  нахилу радіуса-вектора до вертикальної осі печі для початкового її положення:

$$\alpha = \arcsin(e/r_0).$$

Плече прикладення сили ваги печі  $G_n$ :

$$a = r_0 \sin(\alpha \pm \varphi).$$



Момент опору перекиданню порожньої печі, що має вагу  $G_p$ :

$$M_p = G_p r_0 \sin(\alpha \pm \varphi)$$

де  $r_0$  — величина радіуса вектора від центра кривизни коліски до центра ваги печі;

$\alpha$  — кут нахилу радіуса вектора до вертикальної осі печі;

$\varphi$  — кут повороту, при обертанні за годинниковою стрілкою знак «+», проти «-».

Для визначення перекидного моменту від сили ваги рідкого металу й сили, що діє на приводні рейки, скористаємося аналітичними залежностями. Об'єм, займаний рідким металом у ванні печі, являє собою кульовий сегмент для якого:

$$V_m = nh^2(R_1 - h/3)$$

де  $R_1$  — радіус кульового сегмента;

$h$  — стрілка сегмента (висота рівня металу).

Відповідна сила ваги металу:

$$G_m = V_m \rho = nh^2(R_1 - h/3)\rho,$$

де  $\rho$  - щільність металу.


Висота рівня металу залежно від кута нахилу печі:

$$h_\varphi = R_1 - R_1 \cos(\delta - \varphi) = R_1(1 - \cos(\delta - \varphi))$$

де  $\delta$  — половина центрального кута кульового сегмента для початкового рівня металу (див.рис. 3.4, б).

Замінивши  $h$  значенням  $h_\varphi$  одержують формулу для визначення сили ваги металу залежно від кута нахилу печі:

$$G_m = \pi R_1^3 [1 - \cos(\delta - \varphi)]^2 [1 - (1 - \cos(\delta - \varphi))/3] \rho$$



Центр ваги кульового сегмента розташовується на його осі симетрії, і координату центра ваги по осі  $y$  не знаходять. Перекидний момент від сили ваги рідкого металу в печі:

$$M_M = G_M n \sin \varphi$$

де  $n$  — відстань між віссю обертання печі  $O_1$  (центром опорних сегментів колиски) і твірною кульового сегмента (радіусом кулі)  $O_2$ .

Момент від сил тертя кочення печі по опорах із урахуванням пружного стиску опорних сегментів печі:

$$M_{тр} = (G_n + G_m) k$$

де  $k$  — плече деформації, м;

$$k = \left( \frac{2,16}{4} \right) \sqrt{2R(G_n + G_m) \frac{1}{Et}}$$

де  $R$  - радіус опорних сегментів, м;

$E$  — модуль пружності матеріалу, Па;

$l$  - сумарна довжина твірних двох опорних сегментів, м.

Повний перекидний момент:


$$M_{заг} = M_n + M_M + M_{тр}$$

Сила, що діє на зубчасті рейки (у випадку електромеханічного приводу) або на штоки циліндрів (у випадку гідравлічного приводу) від перекидного моменту при повороті печі:

$$F_\varphi = M_{заг} / S$$

де  $S$  — плече прикладення сили  $F_\varphi$ .

Плече  $S$  визначається величиною відстані від миттєвого центра обертання (крапки  $C$ ) до осі рейки або штока (пряма  $MN$ ) (див.рис. 3.4). Крапка  $C$  має координати  $x_3, y_3$ , а крапки  $M$  і  $N$  відповідно  $x_2, y_2$  і  $x_1, y_1$ . Координати крапки  $C$ :


$$x_3 = R (\beta + \varphi); y_3 = 0,$$

де  $R$  — радіус опорного сегмента;  
 $\beta$  — кут нахилу лінії  $MO_1$  до осі печі;  
 $\varphi$  — кут повороту печі.

Координати точки  $M (x_2, y_2)$  торкання рейки і шестірні внаслідок малої величини її зсуву при нахилі печі приймають постійними, обумовленими конструктивними розмірами механізму нахилу печі. Координати точки  $N$  для будь-якого положення печі знаходять по рівняннях циклоїди:

$$\begin{aligned}x_1 &= R (\beta + \varphi) - l \sin (\beta + \varphi); \\y_1 &= R - l \cos (\beta + \varphi),\end{aligned}$$

де  $l$  — відстань від центра коліски  $O_1$  до шарніра рейки  $N$ .

Не приводячи викладень, записують вираження для знаходження плеча  $s$ :

$$\begin{aligned}S &= \frac{A(x_2 - x_1) + y_1}{\sqrt{A^2 + 1}}, \\A &= (y_2 - y_1)/(x_2 - x_1).\end{aligned}$$

Повна сила, що діє на зубчасті рейки з урахуванням складової від сили ваги самих рейок :

$$F_0 = F_\varphi + G_p \cos \psi'$$

де  $G_p$  — сила ваги рейок;  
 $\psi'$  — кут нахилу рейки до вертикалі.

Статичний наведений момент на валу електродвигуна:

$$M_c = F_0 d_{ш} / 2u\eta$$

де  $d_{ш}$  — початковий діаметр рейкової шестірні;  
 $u$  та  $\eta$  — передаточне число й к.к.д механізму.



Статична потужність двигуна, кВт:

$$N_{\text{дв}} = M_{\text{с}} \cdot n_{\text{дв}} / 9550,$$

де  $n_{\text{дв}}$  — частота обертання двигуна,  $\text{хв}^{-1}$

### **ВПРАВИ:**

1 Розрахувати потужність двигуна гвинтового механізму підйому склепіння (див. рис.3.1) за наступних даних: маса склепіння 50000кг, висота підйому склепіння 500мм, крок гвинта передачі 24 мм, передатне число редуктора – 25, частота обертання двигуна 1000 об/хв.

2 Розрахувати потужність двигуна гвинтового механізму підйому склепіння (див. рис.3.2) за наступних даних: маса обертових частин 65000кг, відстань від центра ваги системи до осі повороту  $x_0 = 3650$  мм;

відстань між осями підшипникових опор  $h = 2800$ мм,  $d_{\text{А,В}} = 150$  мм,  $d_{\text{С}} = 400$ мм,  $f_1 = 0,008$ ,  $f_2 = 0,012$ ,  $t = 20$  с.

### **Контрольні питання:**

- 1 Назвіть призначення механізму нахилу ДСП.
- 2 Які типи приводів використовуються у механізмі нахилу ДСП?
- 3 Назвіть призначення механізмів підйому і повороту склепіння.
- 4 Розкрийте схеми механізмів підйому і повороту склепіння з розміщенням на колісці та на фундаменті.
- 5 Назвіть призначення механізму переміщення електродів.
- 6 Які бувають типи механізмів переміщення електродів?



## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 4

### Електрична дуга

**Мета заняття** - закріпити теоретичні знання з теорії електричної дуги.

#### **Питання для обговорення:**

1. Дайте визначення електричної дуги.
2. Поясніть фізику виникнення термоелектронної емісії.
3. Як відбувається іонізація між електродного проміжку?
4. Що таке деіонізація і дифузія, до чого вони призводять?
5. Поясніть складові частини електричної дуги.
6. Чому мають місце стрибки падіння потенціалу біля аноду і катоду?
7. Чому торець катоду набуває конусної форми?
8. Як напруга дуги залежить від її довжини?
9. Які є способи регулювання електричного режиму дуги?
10. Чим дуга змінного струму відрізняється від дуги постійного струму?
11. Від чого залежить можливість горіння або затухання дуги при переході через 0.
12. Поясніть фізику появи пауз у горінні дуги при зміні полярності струму?
13. Що таке напруга запалювання, коли вона виникає?
14. Поясніть характер зміни напруги під час горіння і затухання дуги.
15. Вкажіть чинники, що забезпечують стале горіння дуги у потужних електропечах.
16. Як відбувається перехід струму через 0 у потужних і малопотужних печах. Як це впливає на характер вольт-амперної характеристики дуги?
17. Чому на початку розплавлення металу на осцилограмах напруг дуги мають місце численні стрибки напруги?
18. Як змінюються струм і напруга дуги на різних стадіях розплавлення металу?
19. Назвіть умови, сприятливі для стійкого горіння дуги.
20. Як можна зменшити кількість коротких замикань на початку розплавлення металу?
21. Як впливає індуктивний опір на стійкість горіння дуги?
22. Як розподіляється температура по об'єму дуги?
23. Як відбувається теплообмін між дугою і оточуючим середовищем?
24. Чому має місце відхилення дуг сусідніх електродів.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 5

### Визначення потужності пічного трансформатора

**Мета заняття** – набуття навичок з розрахунку параметрів пічного трансформатора.

#### Теоретичні відомості:

Потужність трансформатора дугової сталеплавильної печі визначається за умовами розплавлення, під час якого в печі витрачається найбільша частина електроенергії.

Середня активна потужність, яку необхідно виділяти в дуговій печі в період розплавлення, визначається сумарною витратою електроенергії та тривалістю розплавлення «під струмом» (тобто загальною тривалістю розплавлення за вирахуванням часу, протягом якого піч не споживає електроенергії):

$$P_{\text{акт.ср}} = \frac{W_{\text{эл}}}{\tau_{\text{р.т}}}$$

де  $W_{\text{эл}}$  – сумарна кількість енергії (тепловий баланс печі)

$\tau_{\text{р.т}}$  - тривалість розплавлення «під струмом», год.

Знаючи середню активну потужність періоду розплавлення, можна визначити необхідну потужність пічного трансформатора  $S'$ :

$$S' = \frac{P_{\text{акт.ср}}}{K_{\text{исп}} \cdot \cos\varphi}$$

де  $K_{\text{исп}}$  - коефіцієнт використання потужності пічного трансформатора в період плавлення;

$\cos\varphi$  – середній коефіцієнт потужності дугової печі в період розплавлення.

Для умов роботи сучасних надпотужних дугових печей великої ємності середній коефіцієнт потужності під час розплавлення перебуває у межах 0,72-0,68.

Коефіцієнт використання потужності трансформатора в період розплавлення враховує неможливість роботи печі протягом усього

періоду розплавлення на максимальній потужності (зокрема, через небезпеку перегріву футерування стін і зведення довгими електродугами до кінця розплавлення), а також коливання потужності, що вводиться в піч, за рахунок недосконалості системи автомат. потужності печі та за рахунок нестабільності напруги мережі живлення. При проектуванні печей коефіцієнт  $K_{ісп}$  зазвичай приймається не більше 0,8-0,9.

Таблиця 5.1 – Стандартні значення номінальної потужності пічних трансформаторів

Номінальна потужність, МВА	4+ 20%	8+ 20%	12,2+ 20%	20+ 20%	32+ 20%	50+ 20%
Номінальна первинна напруга, кВ	6; 10	6; 10	10; 35	35	35	35
Граничне значення вторинної напруги, В	281- 118	318- 120	370- 130	407- 144	465- 159	590- 200

Вибір кількості ступенів напруги трансформатора

У технологічному процесі ведення плавки раціонально мати різні періоди різні потужності і довжину дуги, що досягається перемиканням високовольтною обмотки пічного трансформатора. Плавлення ведуть на вищому ступені напруги та довгих дугах, рафінування – на малій потужності та коротких дугах.

Межі напруги, залежно від ємності печі, становлять, як показано в табл.5.2.

Таблиця 5.2 - Межі напруги, залежно від ємності печі

Ємність печі, т	1,5	3	6	12	25	50	100
Межі напруг, В	104- 225	116- 242	115- 280	120- 320	132- 390	146- 430	163- 480

Половина ступенів виходить при з'єднанні обмотки високої напруги трикутником, друга половина - при з'єднанні зіркою. Число ступенів напруги вибираємо в залежності від напруги верхнього ступеня за табл. 5.3.



Таблиця 5.3 - Залежність числа ступенів напруги від напруги верхнього ступеня

Напруга верхньої ступені, В	200-250	260-300	320-400	400-500	600
Число ступенів напруг	2-4	4-6	6-8	8-12	До 23

Виходячи з ємності печі за даними табл. 5.1 та 5.2 вибираємо кількість ступенів напруги. При цьому приймаємо половину ступенів напруги при з'єднанні високої напруги обмотки трикутником і другу половину ступенів при з'єднанні зіркою.

Верхню межу напруги визначаємо з рівняння:  
для основного процесу

$$U = 15 \sqrt[3]{P_{\text{акт.сп}}}$$

для кислого процесу

$$U = 70 + 15 \sqrt[3]{P_{\text{акт.сп}}}$$

При включенні обмоток за схемою трикутник:

$$U_{i+1} = 0,85U_i$$

При включенні обмоток за схемою зірка:

$$U_{i+1} = \frac{U_i}{\sqrt[2]{3}}$$

де  $U_i$  - напруга попередньої ступені;  
 $U_{i+1}$  – напруга наступної ступені.

**ВПРАВИ:** визначити потужність трансформатора, кількість ступенів напруг та їх величину: ємність печі 100 т, тепловий баланс печі  $W_{\text{еп}} = 7500$  кВт год, тривалість розплавлення «під струмом»,  $t_{\text{рт}} = 1,5$  год.



## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 6

### Вибір типу та визначення розмірів електрода

**Мета заняття** - набуття навичок з вибору типу та визначення розмірів електродів ДСП.

#### Теоретичні відомості:

Для підведення електроенергії до робочого простору ДСП застосовують графітовані електроди. Електроди повинні мати високу електропровідність, низьку теплопровідність, підвищену температуру початку окислення на повітрі, малим вмістом золи і сірки, високою механічною міцністю та гарною оброблюваністю.

Однією з найважливіших показників якості електродів є допустима щільність струму  $j$  (А/см<sup>2</sup>), тобто. пропускну здатність струму. За допустимою щільністю струму можна розраховувати діаметр електрода ( $d_e$ , см):

$$d_e = \sqrt{\frac{4I_e}{\pi \cdot j}},$$

де  $I_e$  - сила струму в електроді, А;  
 $j$  – щільність струму, А/см<sup>2</sup>.

Допустимі щільності струму електродів марок ЕГО та ЕГ1 наведені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 - Допустимі щільності струму електродів марок ЕГО та ЕГ1

$d_e$ , мм	100	200	300	400	500	610
$j$ , А/см <sup>2</sup>	32	23	19	16	15	12-14

Допустимі значення струму за наведено у табл. 6.2. Для електродів марок ЕГОА та ЕГОА1 допускається збільшення щільності робочого струму на 10 – 15%. Електроди для надпотужних печей мають підвищену якість і допускають щільність струму до 30 А/см<sup>2</sup>, що дозволяє підняти струм в електроді діаметром 555 мм до 77,6 кА та в електроді діаметром 610 мм до 88 кА. Це дозволяє довести живлення трифазної ДСП до потужності 115 ÷ 130 МВА та більше.

Таблиця 6.2 - Допустимі значення струму

$d_e, \text{ мм}$	100	200	300	400	500	610	710
$I_e, \text{ кА}$	2,35	6,9	12,7	20,1	28,5	31,0-42,2	44,0-50,0

Струм (А), що протікає в електроді, для трифазних печей встановлюється за  $S_{\text{ном}}$  і  $U_{2\text{л.в.}}$ :

$$I_3 = \frac{S_{\text{ном}} \cdot 10^3}{U_{2\text{л.в.}} \cdot \sqrt{3}},$$

де  $S_{\text{ном}}$  – номінальна потужність трансформатора, кВА.

За величиною  $I_e$  визначається діаметр електрода, см:

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{0,406 \cdot I_3^2 \cdot \rho_3}{W}}$$

де  $\rho_e$ - питомий електроопір електрода, Ом · см;

$W$  - потужність, що відводиться поверхнею електрода в навколишній простір, що дорівнює 2,1 Вт/см<sup>2</sup>при 500<sup>0</sup>С.

У табл. 6.3 наведено значення питомих електроопорів електродів .

Таблиця 6.3 – Значення питомих електроопорів електродів

$d_e, \text{ мм}$	Питомий електроопір електрода, Ом · см		
	ЕГОО, ЕГООА	ЕГО, ЕГОА	ЕГ, ЕГА
75-200	7,5	7,6-8,0	8,1-10
250-400	8,0	8,1-9,0	9,1-10
450-555	8,0	8,1-9,0	9,1-12,5
610		8,0	9,0

Підбирається стандартний діаметр електрода і йому визначається щільність струму, А/см<sup>2</sup>:

$$j = \frac{I_3}{\pi \cdot d_3^2 / 4} = \frac{4I_3}{\pi \cdot d_3^2},$$

Довжину електрода  $l_e$  ДСП визначають за формулою:

$$l_e = H_B + H_{п.п} + \delta_{ск} + H_{охл} + H_{эд} + H_{зап} + (100 \dots 150)$$

де  $H_B$  – повна глибина ванни, мм;

$H_{п.п}$  – висота плавильного простору, мм;

$\delta_{ск}$  – товщина склепіння, мм;

$H_{охл}$  – висота виступає над склепінням частини ущільнювача охолоджувача електродного отвору у склепінні, мм;

$H_{эд}$  – висота корпусу електродотримача, мм;

$H_{зап}$  – запас довжини електрода на одну-дві плавки, мм;

100...150 – запас довжини електрода на випадок «зростання» футерування склепіння при нагріванні, мм.

Висота  $H_{охл}$  визначається:

$$H_{охл} = a d_e$$

де  $a$  – коефіцієнт, що дорівнює  $0,3 \div 0,6$  (менше значення для більших діаметрів електрода).

Висота корпусу електродотримача:

$$H_{е.л} = 1,2 d_e$$

Запас довжини електрода

$$H_{зап} = 420 \frac{m_e \cdot G \cdot N}{\rho_{эл} \cdot d_e^2},$$

де  $m_e$  – середня витрата електродів на 1 т рідкої сталі,  $5 \div 7$  кг/т;

$G$  – маса садки, т;

$N$  – число плавок;

$\rho_{эл}$  – об'ємна маса електрода, що дорівнює  $1550 - 1600$  кг/м<sup>3</sup>;

$d_e$  – діаметр електрода, м

**ВПРАВА:** визначити розміри та вибрати марку електрода, якщо  $I_e = 30\ 000$  А;  $j = 20$  А/см<sup>2</sup>,  $\rho_e = 8$  Ом см; для визначення довжини електрода прийняти розміри робочого простору печі з практичного заняття 2.



## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1 Воденніков С. А., Галицький Ю. П., Воденнікова О. С. Теорія та технологія електросталеплавильного виробництва : навчальний посібник. Запоріжжя : Видавництво Запорізької державної інженерної академії, 2010. 246 с.

2 Karbowniczek M. Electric Arc Furnace Steelmaking. CRC Press, 2021, 262 p. URL: <https://read.kortext.com/inventory/search/963307>.



*Навчально-методичне видання*

Доброносів Юрій Костянтинович

**Синегін Євген Володимирович**

## **ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ СТАЛІ**

**методичні вказівки  
до практичних занять**

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції