

## **ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА КОРИСНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ПЕРЕПЛАВУ**

*Г. О. Ремізов, Ю. Я. Готвянський*

*Національний технічний університет України*

*“Київський політехнічний інститут”*

Представлена апробированная методика расчёта электрических параметров и полезной мощности вакуумно-дугового переплава. Расчёты теоретически обоснованы и практически проверены.

Представлена методика розрахунків електричних параметрів та корисної потужності вакуумно-дугового переплаву. Наведені розрахунки теоретично обґрунтовані і пройшли практичну перевірку.

The design procedure of electric parameters and useful capacity vacuum-arc remelting is presented it is tried. Calculations are theoretically proved and checked practically up.

Отримання оптимальних техніко-економічних показників в значній мірі визначається якістю і обґрунтованістю проведених попередніх розрахунків. Відсутність єдиних методичних підходів, а також наявність значної кількості емпіричних залежностей часто не дозволяють фахівцю, особливо при відсутності особистого досвіду, досконально розібратись в розрахунках, що пропонуються, урахувати всі необхідні фактори, від яких залежать ті чи інші параметри агрегату, спроектувати ту чи іншу піч за означеними вимогами тощо.

Уточнення і вирішення означених питань сьогодні без сумніву має актуальне значення. В зв'язку з чим з урахуванням набутого вітчизняного і світового досвіду пропонується методика обґрунтованого розрахунку електричних параметрів дугових вакуумних печей.

Джерелом тепла у ДВП є електричний розряд між електродом і ванною рідкого металу, який за своїми характеристиками ( низька напруга, велика щільність струму  $(1-5) \cdot 10^4 \text{ A/m}^2$ ) належить до дугових.

З електричної точки зору ДВП має специфічну коаксіальну систему електродів – стрижень (катод), оточений анодом (кристалізатором і поверхнею ванни металу).

На прикатодну область доводиться найбільша частина напруги (катодний спад напруги), величина якої становить 14-23 В і залежить від металу, що переплавляється (табл.1).

Таблиця 1

Розподіл напруги в дузі при ДВП

Параметр	Метал									
	Fe	Ni	Cr	Ti	Zr	Mo	W	Ta	Nb	Cu
Катодний спад напруги, $U_k, B$	15-18	16-19	20-23	17-20	20-23	14-17	15-19	15-16	12-19	11-15
Градiєнт потенціалу в стовпі дуги, $E_{cm}, B/m$	190	250	170	150	240	200	240	100	260	280
Анодний спад напруги, $U_a, B$	0,3-2,3	0-3,5	0-0,19	2,5-7,5	0,8-4,8	16,4-16,6	9,5-13,2	12,2-23,2	9,9-11,2	6,6-8,6

Спад напруги в стовпі дуги визначається градiєнтом напруги  $E_{cm}$ , який залежить від багатьох факторів, його значення, як правило, знаходиться в межах 40 до 250 В/м, збільшуючись із підвищенням тиску. Таке низьке значення градiєнта пояснюється малим числом зіткнень у стовпі й більших довжинах вільного пробігу часток. У результаті напруга дуги слабо залежить від її довжини, що висуває специфічні вимоги до систем живлення й керування ДВП.

Особливістю вольт-амперної характеристики [1] дуги у вакуумі є порівняно невелика величина напруги на дузі при малій крутизні характеристики. Безпосередньо до анода прилягає область негативного просторового заряду, що визначає наявність прианодного падіння потенціалу  $U_a$ . Значення  $U_a$  невелике, залежить від сили струму і тиску в системі й становить від 0,3 до 12-16 В (табл.1).

Вольт-амперні характеристики дуги ДВП описуються виразом:

$$U_d = U_{k-a} + \kappa \cdot \frac{l_d}{d_{el.}} \cdot I, \quad (1)$$

де  $U_d$ ,  $I$ ,  $l_d$  – напруга (В), струм (А), і довжина дуги (мм);  $d_{el.}$  – діаметр електрода, мм;  $\kappa$  - коефіцієнт пропорційності, який залежить від переплавляемого металу і становить відповідно:

- для сталі  $2 \cdot 10^{-3}$  Ом;
- для титана  $4 \cdot 10^{-3}$  Ом;
- для молибдену  $5,5 \cdot 10^{-3}$  Ом.

Слід зазначити, що вираз (1) описує статистичну вольт-амперну характеристику дуги, що визначає залежність між усередненими за досить значний проміжок часу (не менш 0,7-0,8 с) значеннями напруги й струму. Хоч цей вираз не досить точно описує залежність напруги дуги від її довжини, але він все ж таки дає можливість робити енергетичні розрахунки ВДП та обирати джерела живлення.

Значення напруги на дузі є сумою падіння потенціалів в приелектродних областях стовпа дуги:

$$U_{\partial} = U_{\kappa} + U_a + E_{cm} \cdot l_{\partial}, \quad (2)$$

де  $E_{cm}$  – градієнт потенціалу в стовпі дуги, В/м (див. табл.1)

При відносно коротких дугах (20-50 мм) на промислових печах ДВП спостерігаються наступні значення напруг на дузі (табл.2).

Таблиця 2

Напруга на дузі (середні значення) ДВП у промислових печах

Метал	Ti	Zr	Ni	Fe	Cr	W	Nb	Ta	Cu	Mo
$U_{\partial}, B$	24-32	28-35	23-30	21-25	22-30	26-33	31-36	28-40	26-32	36-40

Із збільшенням струму й довжини дуги напруга на дузі зростає.

Електричний режим ВДП визначає не тільки техніко-економічні показники роботи печі (продуктивність, питому витрату електроенергії), але і якість виплавлених зливок. Величина лінійної щільності струму  $j$  при  $D_{зл.} \rightarrow 0$  називається “базовою лінійною щільністю струму” та є характеристикою для даного металу (таблиця 3).

Таблиця 3

Базова лінійна щільність струму на зливку

$j_{баз.}$	Метал							
	Al	Fe	Ni	Ti	Zr	Nb	Mo	W
$A/m$	$1,84 \cdot 10^4$	$1,55 \cdot 10^4$	$1,55 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$3,5 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^4$

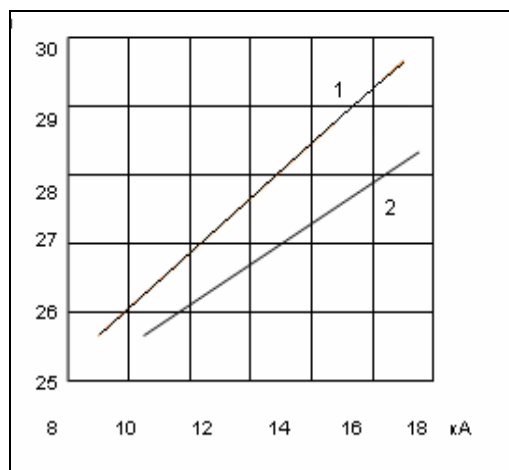


Рис.1 Вольт-амперні характеристики печі ДСВ-6,3Г6 під час переплаву сталюого зливка: 1-  $l_d = 50$  мм; 2-  $l_d = 20$  мм.

Електричний режим, що відповідає оптимальним умовам кристалізації, визначається лінійною щільністю струму:

$$j_{opt.} = \frac{I_p}{D_{кр.}}, A/m, \quad (3)$$

При перепаві сталі й сплавів на основі нікелю і заліза максимальна сила струму під час наведення розплаву матиме наступне значення:

$$I_{max} = 2 \cdot I_p, A, \quad (4)$$

Виходячи зі значення струму при ДВП Белянчиков Л. Н. [3] та Єгоров А. В. [4] пропонують для визначення напруги дуги наступну формулу:

$$U_d = (U_k + U_a) + R \cdot I_p, B \quad (5)$$

де  $I_p$  – робоча сила струму,  $A$ ;  $R$  – опір стовпа дуги,  $Om$ .

Опір стовпа дуги ( $R$ ) залежить від діаметра електрода ( $d_{ел.}$ ), діаметра кристалізатора ( $D_{кр.}$ ) і довжини дуги ( $l_d$ ):

$$R = \frac{6 \cdot D_{кр.}}{d_{ел.}^2} \cdot (1 + 5 \cdot \sqrt{l_d}) \cdot 10^{-5}, Om \quad (6)$$

де  $d_{ел.}$ ,  $D_{кр.}$ ,  $l_d$  виражені в  $m$ .

Зазвичай плавки проводять при довжині дуги  $0,02$   $m$ . В цьому випадку значення  $R$  можна знайти за виразом:

$$R \approx \frac{D_{кр.}}{d_{ел.}^2} \cdot 10^{-4}, Om \quad (7)$$

Таким чином, для сталі спад напруги на дузі можна визначити з наступного емпіричного рівняння:

$$U_{\partial} = 18,0 + 1,4 \cdot d_{\text{ел.}} \cdot \frac{D_{\text{кр.}}}{d_{\text{ел.}}^2} \cdot I_p \cdot 10^{-4}, B \quad (8)$$

Металургійні процеси в ДВП зв'язані [1] зі швидкістю процесу переплаву.

**Це обумовлено наступним:**

- час плавлення, кількість рідкого металу та його перебування в розплавленому стані визначають процеси дегазації, видалення неметалічних включень і летючих домішок;
- від швидкості плавлення залежить характер формування металеві ванни (форма й глибина)<sup>1</sup>, характер зміни швидкості кристалізації, напрямок росту кристалів, величина «двофазної області» (температурна межа ліній liquidus і solidus), що є вирішальними чинниками формування структури зливка;
- зі швидкістю плавки зв'язані параметри електричного режиму – сила струму ( $I_{\partial}$ ) і напруга на дузі ( $U_{\partial}$ ).

Швидкість плавки визначається енергетичним балансом електрода. При полярності електрод-катод електрод одержує енергію від позитивних іонів, що потрапляють на нього, і збуджених атомів, а віддає енергію емітуючим електронам, а також втрачає її у вигляді теплових втрат.

Швидкість плавки згідно з енергетичним балансом електрода можна визначити за виразом:

$$M_{\text{пл}} = \frac{U_{\kappa} + 14 \cdot d_{\text{ел}} - \varphi - \frac{E_{\text{в}}}{1 + (d_{\text{ел.}}^2)/(D_{\text{кр.}} \cdot l_{\partial})}}{Q} \cdot I - \frac{\Psi}{Q} \cdot \frac{d_{\text{ел}}^2}{1,39 \cdot D_{\text{кр.}} + d_{\text{ел}}}, \text{кг/с} \quad (9)$$

де  $U_{\kappa}$  - катодний спад напруги (потенціалу) в вакуумі, В;  $d_{\text{ел}}$  - діаметр електрода, м;  $\varphi$  - робота виходу електронів, В;  $E_{\text{в}}$  - потенціал збудження атомів газу або пару в якому горить дуга, В;  $D_{\text{кр}}$  - діаметр кристалізатора, м;  $l_{\partial}$  - довжина дуги, (зазвичай дорівнює 0,02 м);  $I$  - сила струму, А;  $Q$  - кількість енергії, необхідної для нагрівання одиниці маси металу від 20<sup>0</sup>С до температури плавлення та для розплавлення металу, Дж/кг;  $\Psi$  - коефіцієнт, що визначає теплові втрати бічною поверхнею електрода, Вт/м (для сталі  $\Psi \approx 3 \cdot 10^5$  Вт/м);

<sup>1</sup> - Для розрахунків можна прийняти, що при переплаві сталі й сплавів на основі нікелю й заліза оптимальні умови кристалізації дотримується за умови:  $H_{\text{в}} \approx 0,5D_{\text{зл}}$ .

Значення енергетичних параметрів плавки для деяких металів наведені в таблиці 4. На практиці плавку багатьох марок сталі, схильних до ліквіації, проводять з мінімальною швидкістю, нижня межа якої визначається якістю поверхні зливка (табл. 5).

Таблиця 4

Енергетичні параметри вакуумно-дугової плавки металів

Параметр	Метал								
	Al	Fe	Ni	Ti	V	Zr	Nb	Mo	W
$Q, \text{кДж/кг}$	1084	1220	1250	1732	1560	1040	974	1180	875
$\varphi, \text{В}$	-	4,48- 4,72	5,01- 5,24	4,17	4,44	4,12	4,00	4,15- 4,41	4,50- 4,56
$E_{в}, \text{В}$	2,2	3,3	3,2	2,8	2,7	2,8	2,8	3,0	-
$U_{к}, \text{В}$	15	18	18	19,4	15,6	18,0	26,4	17,6	-

Таблиця 5

Масова швидкість вакуумно-дугового переплаву сталей і сплавів

Метал	$D_{кр}, \text{мм}$	Масова швидкість ( $M_{пл}$ ), $\text{кг/год.}, (\text{кг/с})$
Низьколегована сталь	380	250-350 (0,07-0,10)
	630	420-480 (0,12-0,13)
	800	480-550 (0,13-0,15)
	1100	660-760 (0,18-0,21)
Сплав на основі нікелю	380	160-180 (0,044-0,05)
	480	190-220 (0,052-0,06)
	610	210-240 (0,058-0,066)

Масова швидкість плавлення електрода, будучи технологічним параметром печей ДВП, який визначає якість зливка і споживану потужність печі, залежить також від діаметра зливка і заданої глибини металевої ванни:

$$M_{пл} = \frac{\kappa}{\kappa_{фр}} \cdot D_{зл.}, \text{кг/с}, \quad (10)$$

де  $\kappa$  - коефіцієнт, що визначається фізико-хімічними властивостями металу; на підставі експериментальних даних і становить: для сталі 0,15-0,17  $\text{кг/(с}\cdot\text{м)}$ ; для титана 0,25-0,33  $\text{кг/(с}\cdot\text{м)}$ ; для молібдену 0,42-0,47

$\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м})$ .  $k_{\text{фр.}} = \frac{2 \cdot h^{\kappa_{\text{ме.в}}}}{D_{\text{зл}}}$  - коефіцієнт фронту кристалізації, що визначає

характер структури зливка. Для розрахунку приймають:

для сталі  $k_{\text{фр.}} \approx 0,8-0,9$ ;

для титану  $0,3-0,7$ ;

для молибдену  $1,25-1,7$ .

Отже, масова швидкість плавки залежить від фізичних властивостей металу, що переплавляється, і діаметра зливка (рис.2)

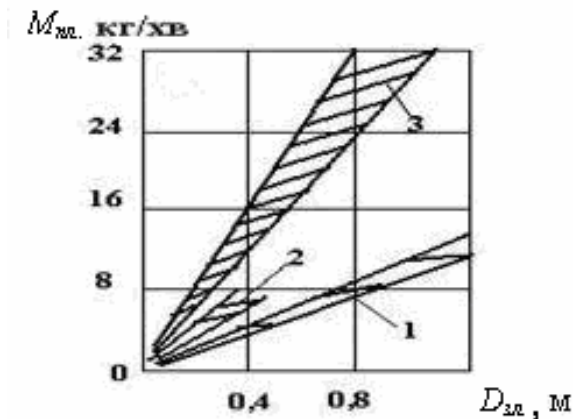


Рис. 2 Залежність швидкості плавлення від діаметра зливка при ДВП сталі (1), молибдену (2) і титана (3)

Слід зазначити, що для даних металу, діаметра електрода, кристалізатора й довжини дуги більшість величин, що входять до формули (9) є постійними.

Це дозволяє зробити спрощення і надати виразу вигляд, більш зручний для розрахунків:

$$M_{\text{пл.}} = K \cdot (I_p - I_0), \text{кг}/\text{с}, \quad (11)$$

де  $K$  - постійний коефіцієнт,  $\text{кг}/(\text{А}\cdot\text{с})$ ;  $I_0$  - максимальна сила струму, що визначає потужність ДВП під час розігрівання електрода з урахуванням теплових втрат; процес протікає до розплавлення металу,  $A$ .

Для сталі при  $d_{\text{ел}}/D_{\text{зл}} \approx 0,7$  і  $I_0$  залежать від діаметра кристалізатора:

$$K = 0,75(1,2 + D_{\text{кр}}) \cdot 10^{-5}, \text{кг}/(\text{А}\cdot\text{с}), \quad (12)$$

$$I_0 = \frac{7D_{\text{кр}}}{1,2 + D_{\text{кр}}} \cdot 10^3, \text{А}, \quad (13)$$

Виходячи з практично набутої інформації про переплав сталей і сплавів на основі нікелю для оцінки масової швидкості переплаву можна скористатися наступним співвідношенням:

$$M_{пл} = \kappa \cdot D_{кр}^2, \quad (14)$$

де  $\kappa \approx (420-720) \text{ кг}/(\text{год} \cdot \text{м})$  - коефіцієнт, обумовлений фізико-хімічними властивостями металу, що переплавляється.

На основі виразу (14) і даних таблиці 6 можна перерахувати пропорційно діаметра кристалізатора масову швидкість плавки проектованої ДВП для аналогічного сортаменту сталей, що переплавляють, і сплавів.

Отримані, тобто обрані значення  $M_{пл}$  повинні узгоджуватись з електричними параметрами – силою струму  $I_p$  і співвідношення  $I_p / D_{кр}$  (таблиця 6).

Таблиця 6

Масова швидкість плавки в ДВП<sup>2</sup>

Метал, що переплавляється	$D_{кр}, \text{мм}$	$M_{пл}, \text{кг/год. (г/с)}$
Сталі: лікваційно-чутливі (конструкційні з вмістом титана й алюмінію більше 2,0 %, підшипникові)	160	70-90 (20-25)
	320	120-160 (35-45)
	400	180-200 (50-55)
	500	250-300 (70-85)
	630	320-390 (90-110)
	710	450-470 (125-130)
лікваційно-нечутливі (корозійностійкі, жароміцні та інші конструкційні)	320	200-250/420-460(55-70/115-130)
	400	250-350/720-800(70-95/200-220)
	500	350/720-780(95/200-215)
	630	420-450/960-1020(115-125/265-285)
	800	490-520(135-145)
	1120	820-850(230-235)
Сплав на основі нікелю	320	160-180 (45-50)
	500	180-200 (50-55)
	630	200-240 (55-65)

Масова швидкість плавки пов'язана з лінійною швидкістю плавлення витратного електрода наступним співвідношенням:

$$v_{пл} = \frac{M_{пл}}{0,25 \cdot \pi \cdot \gamma_{ме.те} \cdot d_{ел}^2}, \text{ м/с} \quad (15)$$

<sup>2</sup> Примітка: чисельник - при звичайному електричному режимі  $I_p/D_{кр} \approx (10-20) \text{ кА/м}$ ; знаменник – при форсованому електричному режимі  $I_p/D_{кр} \approx (35-45) \text{ кА/м}$ .



На рис.3 наведена залежність масової й лінійної швидкостей плавки від діаметра кристалізатора для квазістаціонарного періоду плавки сталі 34ХНЗМА.

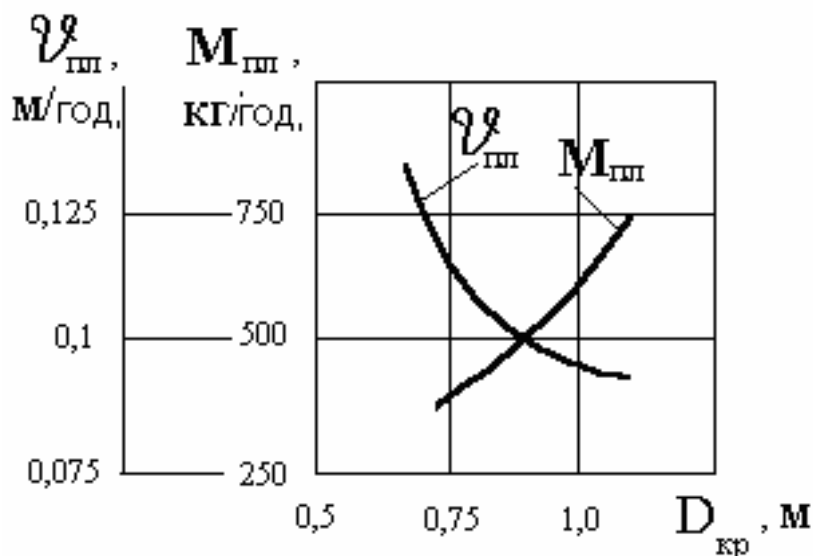


Рис.3 Залежність масової й лінійної швидкостей плавки від діаметра кристалізатора (сталі 34ХНЗМА)

Загальна потужність агрегату поділяється на корисну та потужність теплових втрат. Корисна потужність  $P_{кор.}$  визначається нагріванням металу до температури плавлення ( $T_{пл}$ ) та його перегріванням ( $\Delta T_{нов}$ ).

Вона реалізується як на витратному електроді, так і на поверхні рідкої металеві ванни зливка (перегрів металу до температури поверхні ( $T_{нов}$ ) за рахунок електронного бомбардування). Тому і може бути визначена за формулою :

$$P_{кор} = P_{кор.ел.} + P_{кор.зл.}$$

$$P_{кор} = M_{пл} \left[ \alpha \cdot \left( \frac{T_{нов}}{T_{пл}} \right) + \epsilon \right], \quad (16)$$

де  $\alpha$  і  $\epsilon$ - коефіцієнти, що залежать від теплофізичних параметрів металу що переплавляється (табл.7),  $M_{пл}$  - масова швидкість плавки, кг/с.

При відомій масовій швидкості плавки корисна потужність визначається зміною ентальпії витратного електрода ( $\Delta H_{в.е.} = W_{н.т.к.}$ ) та рідкого металу в ванні на зливку – аноді ( $\Delta H_p = W_{н.т.а.}$ )

Таблиця 7

## Фізичні властивості і параметри деяких металів

Теплофізичні величини	Метал									
	Fe	Ni	Ti	Zr	V	Nb	Mo	W	Al	Cu
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Густина твердого металу, $\gamma_{тв}, \text{кг}/\text{м}^3$	7860	8900	4500	6510	6110	8570	10200	19250	2700	8930
Густина рідкого металу $\gamma_{р}, \text{кг}/\text{м}^3$	7230	7900	4110	5890	5430	8400	9400	17600	2400	8510
Температура плавлення, $^{\circ}\text{C}$	1535	1453	1668	1850	1912	2477	2622	3400	660	1083
Теплоємність тв. металу, $C_m, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$	0,446	0,457	0,562	0,290	0,502	0,265	0,252	0,138	0,871	0,38
Теплоємність рідкого металу, $C_p, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$	0,750	0,66	0,65	0,55	0,77	0,38	0,435	0,222	1,14	0,52
Середня теплоємність в інтервалі $(0-t_{пл}), \bar{C}, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$	0,598	0,56	0,606	0,42	0,636	0,32	0,344	0,18	1,0	0,45
Середній коефіцієнт теплопровідності в інтервалі $(0-t_{пл}), \bar{\lambda}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$	43	73,5	27,0	20,5	42,0	77,0	93,0	128	245	350
Прихована теплота плавлення, $q_{пл}, \text{кДж}/\text{кг}$	270	302	470	250	335	289	293	190	395	215
Теплота випаровування $q_{вип}, \text{кДж}/\text{кг}$	6300	7200	9800	6700	9000	7520	6700	4960	9230	4800
Теплота, що потрібна для нагрівання металу від $20^{\circ}\text{C}$ до $t_m$ і розплавлення, $\text{кДж}/\text{кг}$	1188	1116	1481	1027	1551	1088	1154	802	1055	702

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ступінь чорноти: Твердого металу, $\varepsilon_{тв.}$	0,75	—	—	0,48	—	0,37	0,5	0,4	—	—
Рідкого металу, $\varepsilon_p$	0,4	—	0,35	0,3	—	0,3	0,3	0,3	—	—
Відношення $T_{нов.}/T_{пл.}$ , перегрів $\alpha$ , кДж/кг, (кВт·год./кг)	1,1	1,1	1,1	1,1		1,05	1,03	1,02		
	1151,3 (0,32)	959 (0,27)	1084 (0,30)	1018 (0,28)	1472 (0,41)	941,3 (0,26)	1140,6 (0,32)	754,7 (0,21)	752 (0,21)	563,2 (0,16)
$v$ , кДж/кг, (кВт·год./кг)	32,1 (0,009)	147 (0,041)	395 (0,11)	10 (0,0028)	69,3 (0,019)	134 (0,037)	32,7 (0,009)	43,7 (0,012)	300 (0,08)	128,5 (0,036)
$B$ , $10^{-3}$	19,97	—	—	30,26	—	40,4	30,85	—	—	—
$C$	9,8	—	—	9,08	—	11,12	8,4	—	—	—

$$P_{кор} = M_{пл} \cdot (W_{н.т.к.} + W_{н.т.а.}), \text{ кВт} \quad (17)$$

де  $W_{н.т.к.}$  – питома теоретична витрата енергії на електроді – катоді, кДж/кг (кВт·год./т) – зміна ентальпії 1 кг рідкого металу при нагріві до температури краплепадіння  $T_k$  (для заліза  $W_{н.т.к.} = 1385$  кДж/кг);  $W_{н.т.а.}$  – питома теоретична витрата енергії на зливку – аноді, кДж/кг (кВт·год./т).

Питома теоретична витрата енергії  $W_{п.т.к}$  на катоді - пов'язана з нагріванням витратного електрода від початкової температури ( $T_n$ ), (визначається в результаті протікання струму  $I_d$ ), до температури солідусу ( $T_c$ ) металу, що переплавляється (з урахуванням енерговитрат на можливі фазові переходи першого роду), плавленням та перегріванням рідкого металу на торці електроду від температури ліквідусу ( $T_l$ ) до температури, при якій відбуваються відрив краплі ( $T_k$ ) від торця електрода:

$$W_{н.т.к.} = C_{тв.сп.} \cdot (T_c - T_n) + q_{\phi} + C_{р.сп.} \cdot (T_k - T_l), \quad (18)$$

де  $C_{тв.сп.}$ ,  $C_{р.сп.}$  – середня теплоємність твердого і рідкого металу, що переплавляється (для відповідного інтервалу температур, кДж/кг·К);  $q_{\phi}$  – питома теплота фазового переходу першого роду (при плавленні), кДж/кг;

Середня питома теплоємність для сталей різного хімічного складу становить, (МДж/Т):

- низьковуглецевих - 0,60;
- середньовуглецевих – 0,65;
- високовуглецевих – 0,70;
- хромистих – 0,50-0,65;

хромонікелевих – 0,55-0,60.

Температура початку плавлення ( $T_c$ ) залежить від хімічного складу витратного електрода (шихти):

$$T_c = T_{nl} - \sum \{(\Delta T_c)_i \cdot [n]\}, K \quad (19)$$

де  $[n]$ - вміст елемента в витратному електроді (шихті), %;  $(\Delta T_c)_i$  - питома (на 1,0% вмісту елемента) зниження температури плавлення чистого заліза (1812 K) або чистого нікелю (1726 K), K % (табл.8).

Аналогічно рівнянню (19) можливо визначити температуру ( $T_l$ ) з урахуванням рекомендацій в табл.8.

$$T_l = T_{nl} - \sum \{(\Delta T_l)_i \cdot [n]\}, K \quad (20)$$

Таблиця 8

Зниження температури плавлення заліза та нікелю при введені в сплав 1 мас.% елемента

Елемент	Вміст елемента <sup>*1</sup> , %	$\Delta T_c, K\%$	Вміст елемента <sup>*1</sup> , %	$\Delta T_l, K\%$
1	2	3	4	5
		Залізо		
Алюміній	10	7,0	10	3,4
Ванадій	10	3,4	28	1,2
Вольфрам	12	0,6	15	0,5
Сіліційум	5	18,6	5	13,6
Манган	1,5	20,0	7,5	4,0
Мідь	5,5	8,9	11,5	4,3
Молібден	10	3,4	10	0,9
Нікель	3,4	6,5	6	3,5
	10	4,7	10	3,0
Ніобій	10	8,4	4	17,4
Сірка	0,2	940,0	1	34,0
Тантал	7	17,7	20	6,2
Титан	7	27,7	14	13,9
Вуглець	0,1	410,0	0,5	80,4
	2	186,4	2	72,5
Фосфор	1	184,0	1	34,0
Хром	8	4,0	22	1,4
	22	0	-	-
Цирконій	7,5	27,2	16	12,8

## Продовження таблиці 8

1	2	3	4	5
		Нікель		
Алюміній	-	-	-	-
Ванадій	20	2,6	10	23,0
Вольфрам	30	-1,9 <sup>*2</sup>	20	-2,4 <sup>*2</sup>
Сіліцій	9,3	32,3	5	20,0
	-	-	11,5	35,4
Манган	30	10,0	30	8,8
Мідь	-	-	-	-
Молібден	20	2,6	20	1,0
Нікель	-	-	-	-
Ніобій	10	10,0	23,5	7,7
Сірка	-	-	-	-
Тантал	20	2,6	20	1,9
Титан	11,6	12,8	12,6	11,8
Вуглець	-	-	-	-
Фосфор	-	-	-	-
Хром	47	2,3	35	1,6
Цирконій	0,1	630,0	16	3,9
Цирконій	0,1	630,0	16	3,9

Температура  $T_k$ , яка визначається умовою формування і відриву краплі рідкого металу на торці витратного електрода, залежить від фізико-хімічних властивостей металу, що переплавляється, діаметра електрода та густини теплового потоку, який надходить від дуги.

Перегрівання на катоді ( $\Delta T_k$ ) дорівнює:

$$\Delta T_k = T_k - T_l \approx (175-220) \text{ , } ^\circ K \quad (21)$$

\*1 Кінець області монотонної зміни відповідної лінії на діаграмі стану

\*2 Підвищення температури.

де менше значення – для електродів більшого діаметра із сплавів на основі нікеля; більше – для інших діаметрів меншого діаметра.

Початкову температуру витратного електрода ( $T_n$ ) можна розрахувати з теплового балансу витратного електрода:

$$T_n = \frac{I_d^2 \cdot \rho}{0,25 \cdot \pi \cdot d_{el}^2} = \varepsilon_{зв} \cdot C_0 \cdot (T_n^4 - T_{c.кр}^4) \cdot \pi \cdot d_{el} \quad (22)$$

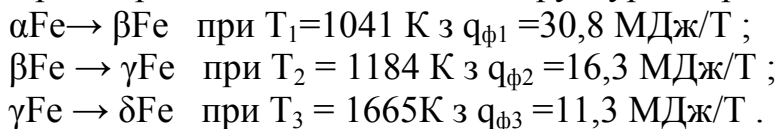
При цьому отримуємо, що :

$$T_n = \sqrt[4]{T_{c.кр}^4 + \frac{I_d^2 \cdot \rho}{0,25 \cdot \pi^2 \cdot d_{el}^3 \cdot \varepsilon_{зв} \cdot C_0}}, \text{K} \quad (23)$$

де  $T_{c.кр}$  – температура водоохолоджувальної стінки кристалізатора (чи робочої камери), як правило дорівнює 300-320 K;  $I_{d,max}$  – максимальний струм дуги, A;  $\rho$  - питомий електричний опір матеріалу електрода, знаходиться в межах  $(0,1-1,0) \cdot 10^{-6}$ ; Ом· м;  $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – стала Стефана – Больцмана;  $\varepsilon_{зв}$  – зведений ступінь чорноти системи коаксіальних циліндричних поверхонь електрода ( $\varepsilon_{el}$ ) і кристалізатора:

$$\varepsilon_{зв} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{el}} + \frac{d_{el}}{D_{кр}} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_{кр}} - 1 \right)} \quad (24)$$

При нагріванні заліза можливі структурні перетворення:



При плавленні при  $T = 1812$  K, питома теплота фазового переходу першого роду становить  $q_{\phi 4} = 233,1$  МДж/Т .

Таким чином питома теплота всіх переходів при нагріванні та плавленні становить:

- для заліза  $q_{\phi} = \Sigma (q_{\phi})_i = 291,5$  МДж/Т;
- для сталей різноманітного хімічного складу :  $q_{\phi} \approx 240-285$  МДж/Т;
- для нікелевих сплавів  $q_{\phi} \approx 270-340$  МДж/Т.

Питома теоретична витрата енергії  $W_{п.т.а}$  на аноді - пов'язана з перегріванням рідкого металу в ванні на зливку – аноді з температурою  $T_k$  до температури поверхні ванни  $T_{пов}$  :

$$W_{н.т.а.} = \int c_p \cdot dT \approx c_{p.ср} \cdot (T_{нов} - T_k) \quad (25)$$

Нагрівання поверхні ванни  $\Delta T_{нов}$  визначається по перегріванню вище температури ліквідусу, яка залежить від теплофізичних властивостей металу, що переплавляється, геометричних розмірів міжелектродного проміжку, а також теплової потужності, що поступає з дугою і характеризується відношенням  $I_{\delta} / D_{кр}$ :

$$\Delta T_{нов} = T_{нов} - T_{л} = \Delta T_{max} \left[ 1 - \left( I_{\delta} / D_{кр} \right)_0 / \left( I_{\delta, max} / D_{кр} \right) \right] \quad (26)$$

де  $\Delta T_{max}$  - максимально можливе перегрівання, К;  $(I_{\delta} / D_{кр})_0$  – густина струму, при якому перегрівання відсутнє.

За даними Л.Н.Белянчикова [3], для сталей при  $l_{\delta} \approx 20$  мм,  $D_{кр} = 100 \dots 600$  мм і  $d_{ел} / D_{кр} = 0,7-0,85$  можна прийняти  $\Delta T_{max} = 480$  К,  $(I_{\delta} / D_{кр})_0 \approx 11$  кА/м.

Наведена методика дозволяє з достатньою імовірністю розрахувати електричні і енергетичні параметри плавки в дугових вакуумних печах, визначити оптимальну масову швидкість плавки та корисну потужність на катоді і аноді з урахуванням процесів кристалізації металу.

#### Література

1. Волохонский Л. А. Вакуумные дуговые печи. – М.: Энергоатомиздат, 1985.-232 с.
2. Плавильні агрегати спеціальної електromеталургії: Атлас: УЗЧ./Уклад. Г. О. Ремізов; За ред. Б. Е. Патона, Д. Ф. Чернеги. – К.: ІВЦ Видавництво “Політехніка”, 2002. – Ч.1: Електрошлакові, дугові та індукційні вакуумні печі. – 96 с.
3. Белянчиков Л. Н. Основы расчёта вакуумных печей. – М.: Металлургия, 1968. – 101 с.
4. Егоров А. В. Расчёт мощности и параметров электропечей черной металлургии. Учебн. пособие Экл. вузов. – М.: Металлургия, 1990. – 280 с.