

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Металлургия стали и сплавов»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к расчетной работе по дисциплине
«Современные процессы рафинирования стали»
на тему «Расчет конструкционных и технологических параметров
установок электрошлакового переплава»
(для студентов направления подготовки 22.04.02 «Металлургия»
магистерской программы «Металлургия стали»)

Донецк, 2018

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Металлургия стали и сплавов»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к расчетной работе по дисциплине
«Современные процессы рафинирования стали»
на тему «Расчет конструкционных и технологических параметров
установок электрошлакового переплава»
(для студентов направления подготовки 22.04.02 «Металлургия»
магистерской программы «Металлургия стали»)

Рассмотрено на заседании
кафедры «Металлургия стали
и сплавов».
Протокол № 9 от 28.03.2018 г.

Донецк, 2018

УДК 669.187.56

Методические указания к расчетной работе по дисциплине «Современные процессы рафинирования стали» на тему «Расчет конструкционных и технологических параметров установок электрошлакового переплава» (для студентов направления подготовки 22.04.02 «Металлургия» магистерской программы «Металлургия стали») / Сост.: Заика В.И., Ратиев С.Н. – Донецк: ГОУВПО «ДОННТУ», 2018. – 18 с.

Составители:

Заика В.И., доц., к.т.н.

Ратиев С.Н., ст. преподаватель.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Вариант № 1.

Параметры слитка		Электрическая схема печи	Марка	
Сечение	Размер, мм		Стали	Флюса
Квадрат	300	Однофазная	40ХМФА	АНФ-6

2. РАСЧЕТ ОДНОФАЗНЫХ ПЕЧЕЙ

2.1. Определение размеров слитка

При заданном сечении слитка (средний диаметр D_{cp}) его длину l (рис. 1) определяют из уравнения:

$$l = (3 + 4)D_{cp} \quad (1)$$

Если плавка производится в квадратных кристаллизаторах, то нужно определить приведенный диаметр, который выбирают из условия равенства площадей квадрата и круга:

$$D_{np} = \frac{a}{0,885} = \frac{300}{0,885} = 339 \text{ мм}, \quad (2)$$

где a – сторона квадрата.

Согласно (1), длина слитка равна:

$$l = 4 \cdot 339 = 1356 \text{ мм}. \quad (3)$$

Вес слитка:

$$G = \frac{\pi \cdot D_{cp}^2}{4} \cdot l \cdot \gamma = \frac{3,14 \cdot 0,3^2}{4} \cdot 1,356 \cdot 7800 = 747,25 \text{ кг}. \quad (4)$$

Здесь γ - удельный вес металла.

При заданном весе слитка сначала находят его диаметр:

$$D_{cp} = \sqrt[3]{\frac{4G}{(3+4)\pi\gamma}} \quad (5)$$

Для определения размеров верхнего и нижнего сечений слитка находят:

$$D_{\text{ср}} = \frac{D_{\text{н}} + D_{\text{в}}}{2}. \quad (6)$$

$$\frac{D_{\text{н}} + D_{\text{в}}}{2} = \frac{2}{100} l, \quad (7)$$

где 2% – минимальная конусность кристаллизатора

Из уравнений (6) и (7) находим:

$$D_{\text{в}} = D_{\text{ср}} - 0,02l = 339 - 0,02 \cdot 1356 = 311,88 \approx 312 \text{ мм} \quad (8)$$

$$D_{\text{н}} = 2D_{\text{ср}} - D_{\text{в}} = 2 \cdot 339 - 311,88 = 366,12 \approx 366 \text{ мм} \quad (9)$$

2.2. Определение размеров кристаллизатора

Длина кристаллизатора (рис.3.1)

$$l_{\text{к}} = l + H + l', \quad (10)$$

где H – высота шлаковой ванны (табл. 1);

l' – высота, учитывавшая наличие сальникового уплотнения в верхней части кристаллизатора, которая принимается равной 150-200 мм.

Размеры верхнего и нижнего сечений кристаллизатора:

$$D_{\text{кн}} = D_{\text{н}} + 2\delta = 366 + 2 \cdot 2 = 370 \text{ мм}. \quad (11)$$

$$D_{\text{кв}} = D_{\text{в}} + 2 \cdot \delta = 312 + 2 \cdot 2 = 316 \text{ мм}. \quad (12)$$

где δ – толщина шлаковой корочки (гарниссажа). Обычно δ – составляет 2-3 мм.

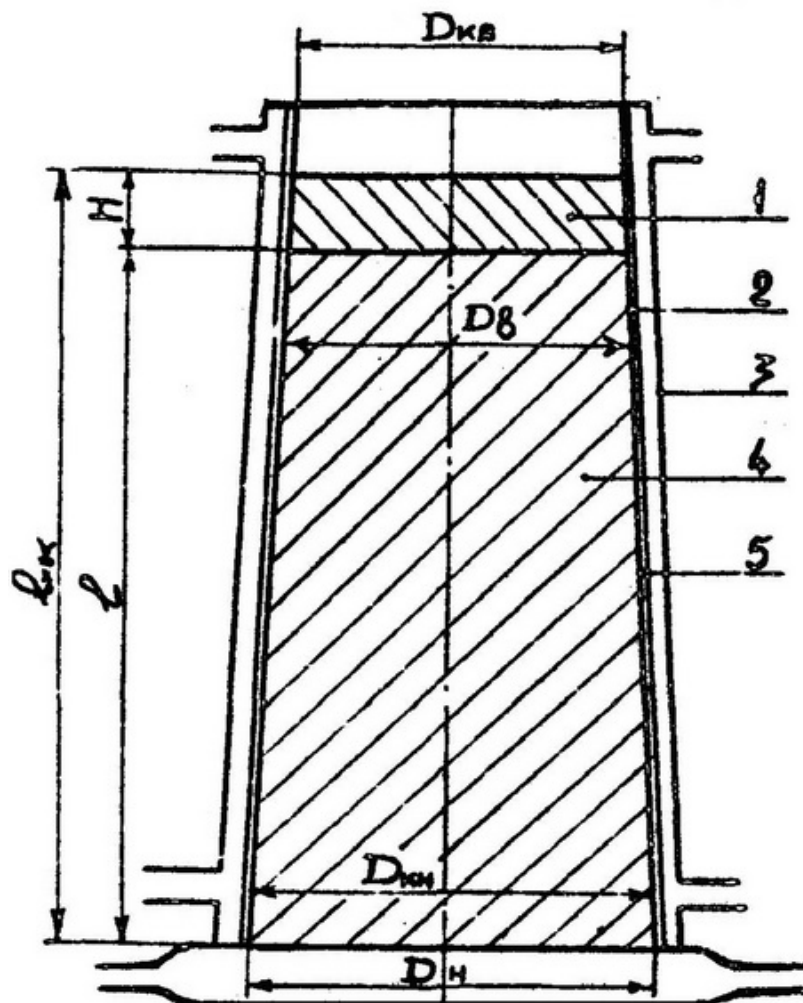


Рис. 1. Параметры слитка и кристаллизатора:

1 - шлак; 2 - шлаковый гарниссаж; 3 - кожух кристаллизатора; 4 - слиток;
5 - медная гильза кристаллизатора.

$D_{кв}$ - верхний диаметр кристаллизатора;

$D_{кн}$ - нижний диаметр кристаллизатора,

$D_{в}$ - верхний диаметр слитка;

$D_{н}$ - нижний диаметр слитка;

l - длина слитка;

$l_{к}$ - длина кристаллизатора;

H - высота шлака.

Таблица 1

Диаметр кристаллизатора, мм	Высота шлаковой ванны, мм
100	50÷60
150	60÷70
200	70÷80
250	80÷100
300	100÷120
400	130÷140
450	140÷170
500	170÷200
550	190÷210
600	200÷220
700	210÷230
800	220÷240
900	230÷250

2.3. Размеры электрода

Диаметр электрода (рис. 2)

$$d_s = (0,6 \div 0,7) D_{кв} = 0,65 \cdot 316 = 205,4 \approx 205 \text{ мм} \quad (13)$$

Если электрод квадратный, то

$$a = 0,885 d_s \quad (14)$$

где a – сторона квадрата электрода.

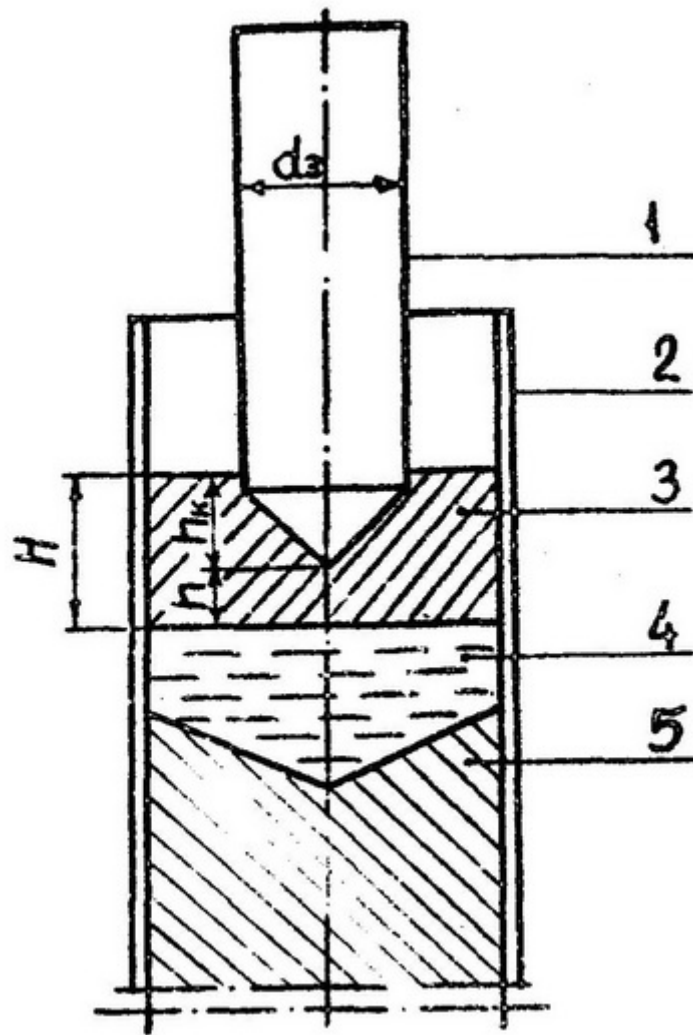


Рис. 2. Параметры электрода и шлаковой ванны:

1 - расходуемый электрод;

2- кристаллизатор;

3 - шлаковая ванна;

4 - металлическая ванна;

5 - слиток;

H - высота шлаковой ванны;

h - межэлектродный промежуток;

h_k - высота конуса.

Длина электрода:

$$l_3 = \frac{l_0^2}{d_3^2} + l_0 = 1356 \cdot \frac{339^2}{205^2} + 50 = 3758,1 \approx 3758 \text{ мм.} \quad (15)$$

где l_0 -длина несплавляемой части электрода (огарка).

Как правило, электрод приваривают к электрододержателю. Электрододержатель - это штанга диаметром 150-200 и длиной - 1500 мм, которую изготавливают из нелегированных, малоуглеродистых сортов стали (Ст 10÷20, и др.). Сварку выполняют электродом той же марки, что и электрододержатель. Огарок оставляют, чтобы не сплавить сварной шов. Длина огарка должна составлять ≥ 50 мм; $l_0 = 700 \div 1200$ мм (если электрод без держателя). Вес электрода:

$$G_3 = \frac{\pi d_3^2}{4} l_3 \gamma = \frac{3,14 \cdot 0,205^2}{4} \cdot 3,758 \cdot 7800 = 967 \text{ кг} \quad (15.1)$$

Высота слоя шлака при погруженном в ванну электроде обычно равна d_3 .

2.4. Расчет необходимого количества шлака

Вес шлаковой ванны к концу плавки:

$$G_{ш} = V \gamma_{ш} = \frac{\pi D_{ш}^2}{4} H \gamma_{ш} = \frac{3,14 \cdot 0,316^2}{4} \cdot 0,13 \cdot 2680 = 27,31 \text{ кг} \quad (16)$$

где $\gamma_{ш}$ - плотность шлака (табл.2)

Плотность шлака в районе температуры затвердевания (γ_3) можно определить по формуле:

$$\gamma_3 = \gamma_{ш} + \alpha (T - T_{пл}) \quad (17)$$

На гарниссаж расходуется $\sim 7\%$ от засыпаемого количества шлака и $\sim 3\%$ теряется за счет его испарения. Тогда суммарное количество шлака на плавку составит:

$$\sum G_{ш} = \frac{G_{ш} \cdot 100}{90} = \frac{27,31}{0,9} = 30,344 \approx 30,35 \text{ кг.} \quad (18)$$

Таблица 2

Шлак	$\gamma_{ш}$, г/см ³	T, °C	T _{пл} , °C	$\alpha \cdot 10^{-4}$, г/см ³
АНФ-1П	2,53	1450	1340	5,3
АНФ-6	2,68	1450	130	6,0
АНФ-291	2,71	1500	1395	2,4
АНФ-292	2,78	1500	1415	1,5

В табл.2 T – температура, при которой измерена плотность шлака;

T_{пл} – температура плавления шлака;

α – температурный коэффициент расширения.

2.5. Расчет электрических параметров установки

Межэлектродное расстояние h (рис.3.2)

$$h = H - \left(\frac{d}{2} + \frac{d}{2} \right) 0,8 = 130 - \frac{205}{2,5} \cdot 0,8 = 64,4 \text{ мм.} \quad (19)$$

Электрическое сопротивление шлаковой ванны / 2 /

$$R = \frac{l^{-1,7} \frac{d}{L_0}}{\pi D_0} \left[1 + 1,5 \left(\frac{h}{H} \right)^{2,3} \right] \quad (20)$$

где R – сопротивление шлаковой ванны, Ом;

x – электропроводность шлака, Ом⁻¹·см⁻¹.

Электрическое сопротивление шлаковой ванны можно проверить по формуле / 3 /

$$R = \rho \frac{4h}{\pi d^2} \cong \frac{4h}{\pi \pi d^2}, \quad (21)$$

где ρ – удельное сопротивление шлака.

Зависимость электропроводности от температуры показана на рис.3.3 /4/.

Электропроводность можно вычислить по уравнениям /5/:

$$\text{АНФ} - 1\text{П}: \ln x = 1,312 - \frac{1135}{T}, \quad (22)$$

$$\text{АН} - 291: \ln x = 4,36 - \frac{7980}{T}, \quad (23)$$

$$\text{АН} - 292: \ln x = 6,16 - \frac{12200}{T}, \quad (24)$$

$$\text{АНФ} - 6: \ln x = 68,2312 - \frac{5230}{T}, \quad (25)$$

Согласно расчетам в специализированной программе сопротивление шлаковой ванны высотой 130 мм, диаметром 300 мм для электрода диаметром 205 мм составит 0,0024 Ома. Примем его в дальнейших расчетах.

2.6. Расчет теплового баланса шлаковой ванны.

Источником тепла при электрошлаковом переплаве служит шлаковая ванна, где в соответствии с законом Джоуля-Ленца при прохождении электрического тока через слой шлака выделяется тепло Q:

$$Q = 0,24I^2Rt = 0,24Pt \quad (26)$$

где: $P=I^2R$,

I – сила тока, А;

R – сопротивление шлака, ом;

тогда:

$$P = \frac{I^2R}{1000}, \text{кВт}, \quad (27)$$

где P - электрическая мощность, подводимая к шлаковой ванне, которая при установившемся («квазистационарном») процессе расходуется на плавление электрода, поддержание в расплавленном и перегретом состоянии шлаковой и металлической ванны, потери тепла с водой, охлаждающей кристаллизатор и поддон; потери тепла излучением шлаковой ванны, а также с отходящими газами. В общем виде тепловой баланс шлаковой ванны может быть представлен следующим уравнением:

$$P = P_3 + P_n + P_c + P_{сл} + P_{ис} + P_{рз}, \quad (28)$$

где P_3 - мощность, расходуемая на плавление электрода, кВт;

$P_{\text{н}}$ - мощность тепловых потерь излучением с неэкранированной электродом поверхности шлаковой ванны, кВт;

$P_{\text{с}}$ - мощность, отводимая от боковой поверхности шлаковой ванны на стену кристаллизатора, кВт;

$P_{\text{сл}}$ - мощность, передаваемая на ванну жидкого металла, кВт;

$P_{\text{ис}}$ - мощность, теряемая при испарении шлака, кВт;

$P_{\text{рз}}$ - мощность, теряемая излучением с поверхности электрода, кВт.

Полезное тепло, расходуемое на нагрев электрода до температуры плавления, сообщение металлу теплоты плавления и перегрев над точкой плавления:

$$P_{\text{з}} = P_{\text{пол}} = 1,16 \cdot 10^{-3} \omega [r + c(t_{\text{пер}} - t_{\text{з}})], \quad (29)$$

где r - скрытая теплота плавления. Для сталей можно принять $r=65$ ккал/кг /3/;

c - удельная теплоемкость (0,19 ккал/кг град /3/);

$t_{\text{з}}$ - температура электрода с учетом нагрева его током (300-400), °С

$t_{\text{пер}}$ - средняя температура перегрева металла в шлаке, °С (металл в шлаке перегревается на 150-250°С) и

$$t_{\text{пер}} = t_{\text{пл}} + (150 + 250)^0 \text{С};$$

ω - удельная скорость плавления, кг/ч.

Удельную скорость плавления находят, используя рис. 3.4 или уравнение:

$$\omega = 0,014D_{\text{к}}, \text{ кг/мин} \quad (30)$$

Для квадратного кристаллизатора:

$$\omega = 0,014D_{\text{кпр}} \text{ кг/мин} \quad (31)$$

Согласно (31), удельная скорость плавления составит:

$$\omega = 0,014 \cdot 339 = 4,746 \approx 4,75 \text{ кг/мин.}$$

Согласно (29), полезное тепло, расходуемое на нагрев электрода составит:

$$P_{\text{з}} = 1,16 \cdot 10^{-3} \cdot 4,75 \cdot [65 + 0,19 \cdot (1539 + 200 - 400)] = 1,760 \text{ кВт.}$$

Мощность, теряемая излучением:

$$P_{\text{н}} = 1,16 \cdot 10^{-3} \varepsilon \sigma (F - F_{\text{э}}) \left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 \quad (32)$$

где:

ε - степень черноты шлака (принимается равной 0,7.) / 6 /;

σ - постоянная излучения абсолютно черного тела равна 4,9 ккал/м²ч⁰К / 6/;

$T_{\text{пов}}$ - температура поверхности шлака, К;

$F, F_{\text{э}}$ - площадь среднего сечения кристаллизатора и электрода соответственно, м².

Согласно (32), мощность, теряемая излучением, составит:

$$P_{\text{и}} = 1,16 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7 \cdot 4,9 \cdot \left(0,316^2 - \frac{3,14 \cdot 0,205^2}{4} \right) \cdot \left(\frac{1700 + 273}{100} \right)^4 = 34,373 \text{ кВт.}$$

Необходимо учитывать, что часть тепла, излучаемого поверхностью шлаковой ванны, используется полезно, обеспечивая предварительный подогрев расходуемого электрода в процессе плавки. Это тепло учитывается температурой расходуемого электрода в уравнении (29).

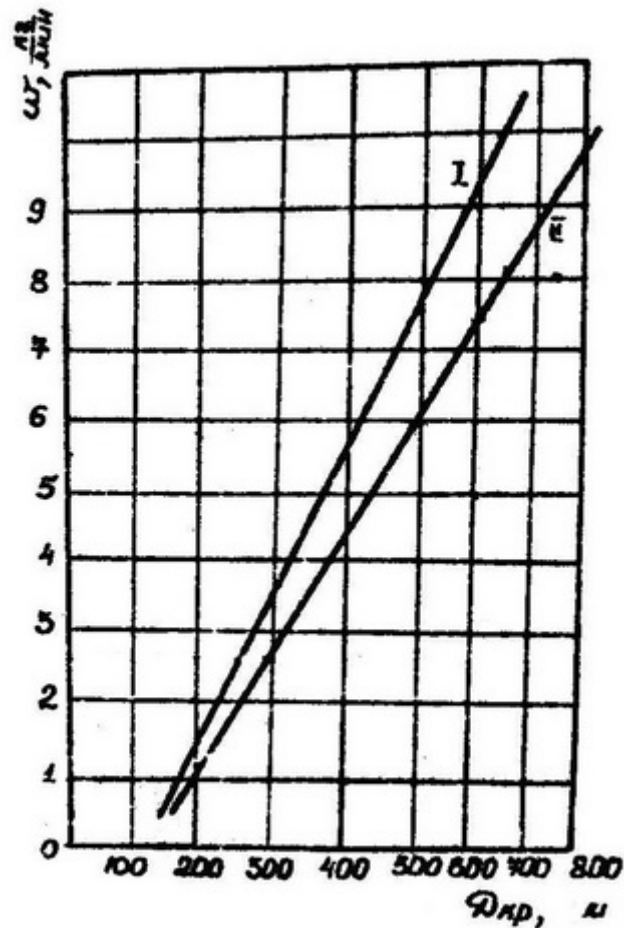


Рис. 4. Скорость плавления электрода в зависимости от диаметра кристаллизатора (флюс АНФ-6):

I – для трехфазных печей;

II – для однофазных печей.

Мощность, отдаваемая стенкам кристаллизатора:

$$P_c = 1,16 \cdot 10^{-3} \lambda F_{\delta} \frac{t_{II} - t_K}{\delta} \quad (33)$$

где λ – коэффициент теплопроводности гарниссажа равен 4 ккал/м ч·град /3/;

t_{II} – температура плавления шлака (см. табл.2);

t_K – средняя температура поверхности шлаковой корочки обычно составляет 600-900⁰С (для АНФ-6 следует брать 750⁰С);

F_{δ} – площадь боковой поверхности шлаковой ванны;

δ – толщина шлакового гарниссажа (2-3 мм)

Площадь боковой поверхности шлаковой ванны равна:

$$F_{\sigma} = \pi \cdot D_k \cdot H = 3,14 \cdot 0,339 \cdot 0,13 = 0,138379 \text{ м}^2.$$

Тогда, согласно (33), мощность, отдаваемая стенкам кристаллизатора, составит:

$$P_c = 1,16 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 0,138379 \cdot \frac{1360 - 750}{0,002} = 195,834 \text{ кВт.}$$

Мощность, передаваемая на ванну жидкого металла от шлака:

$$P_{сл} = 1,16 \cdot 10^{-3} \alpha_{шл} F (t_{ш} - t_{п}) \quad (34)$$

где: $\alpha_{шл}$ - коэффициент теплоотдачи от шлака металлу ($\alpha_{шл} = 4000$ ккал/м²·град).

Согласно (34), имеем:

$$P_{сл} = 1,16 \cdot 10^{-3} \cdot 4000 \cdot 0,3^2 \cdot (1800 - 1360) = 183,744 \text{ кВт.}$$

Мощность, теряемая при испарении шлака:

$$P_{ис} = \frac{gG'}{860}, \text{ здесь } G' = \frac{\sum Q_{ш} \cdot \alpha}{100} \quad (35)$$

где: g - скрытая теплота испарения, ккал/кг;

G' - количество шлака, испаряющегося за плавку, которое составляет ~ 3% от общего веса загружаемого шлака.

$$P_{ис} = \frac{1660 \cdot 30,35 \cdot \frac{3}{100}}{860} = 1,757 \text{ кВт.}$$

Во фтористых шлаках наиболее летучим компонентом является фтористый кальций (CaF₂) и атмосфера над шлаком в значительной мере будет насыщена этим компонентом. Поэтому и в уравнении (35) можно принять g для CaF₂. Теплота испарения CaF₂ / 7 / составляет 99 ккал/моль или 1660 ккал/кг.

Мощность, теряемая излучением с поверхности электрода:

$$P_{из} = K(D_k)^{3/2} \left(\frac{d_r}{D_k}\right)^{3/2} \left(\frac{T_{ш}}{T_{п}}\right)^{5/2} \quad (36)$$

где: k - коэффициент (для стали $k = 102 / 3$);

$T_{ш}$ - температура шлака, К;

$T_{п}$ - температура плавления металла К.

Температура плавления приблизительно может быть найдена по уравнению /8/:

$$T_{п} = (1528 - \sum k'c) + 273,$$

где: c - концентрация элемента, % вес;

k' - коэффициент удельного снижения температуры.

% вес элемента	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	V	Mo	Al
k' , град/прои	71	9.7	4.9	16	3.9	0.9	2.0	1.8	2.7

Согласно (36), мощность, теряемая излучением с поверхности электрода равна:

$$P_{пэ} = 102 \cdot 0,339^{1,5} \cdot \left(\frac{0,205}{0,339} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{2073}{1812} \right)^{2,5} = 13,254 \text{ кВт.}$$

Тогда, общие потери в шлаке, согласно (28), составят:

$$P = P_{э} + P_{н} + P_{с} + P_{сш} + P_{ис} + P_{пэ}$$

$$P = 1,76 + 34,373 + 195,834 + 183,744 + 1,757 + 13,254 = 430,722 \text{ кВт}$$

Рабочий ток согласно (27):

$$I = \sqrt{\frac{P \cdot 1000}{R}} = \sqrt{\frac{430,722 \cdot 1000}{0,0024}} = 13397 \text{ А.}$$

Здесь P определяют в киловаттах, R в Омах.

Рассчитываются напряжения:

а) на шлаковой ванне:

$$P = UI; \quad U = \frac{P}{I};$$

$$U = \frac{P}{I} = \frac{430722}{13397} = 32,151 \approx 32 \text{ В.}$$

б) на приборе;

в) на трансформаторе.

Падение напряжения на электроде составляет $2,0 \div 4,0$ В/м (меньшие значения для малых печей или $\Delta U = (I_3) \cdot (2,0 \div 4,0) = 3,758 \cdot 3 = 11,27$ В.

Здесь l_3 - длина электрода с хвостовиком.

Кроме того, ΔU можно определить по уравнениям:

$$\Delta U = IR_3; R_3 = \rho_3 \frac{l_3}{S};$$

где R_3 - сопротивление электрода;

S - площадь электрода;

ρ_3 - удельное сопротивление материала электрода (из справочников).

Поскольку показания величины напряжения прибор снимает с поддона и зажима электрододержателя, то $U_{\pi} = U + \Delta U = 31,151 + 11,27 = 42,421 \approx 42,5$ В.

Мощность, подаваемая на электрод:

$$P_3 = U_{\pi} I = 42,5 \cdot 13397 = 569372 \text{ Вт.} \quad (39)$$

Потеря мощности в короткой сети составляет 5-5,5%, в трансформаторе 1,6÷1,75% /9, 10/. Сумма потерь $\sum P'_{\pi} = 6,6 \div 7,2\%$. Тогда мощность, снимаемая с трансформатора:

$$P_m = \frac{P_3}{(0,934 + 0,923)} = \frac{569372}{0,925} = 615537 \text{ Вт.} \quad (40)$$

а напряжение на трансформаторе:

$$U_m = \frac{P_m}{I} = \frac{615537}{13397} = 45,946 \approx 46 \text{ В.} \quad (41)$$

Поскольку падение напряжения на электроде, как было уже отмечено, составляет $2,0 \div 4,0$ В/м, то по мере его оплавления мощность на шлаковой ванне увеличивается, что приводит к увеличению скорости плавки. Для того, чтобы сохранить постоянную скорость плавления, следует иметь постоянную мощность на шлаковой ванне. Поэтому рекомендуется после сплавления каждого метра

электрода снимать напряжение на 2-4 В. Время τ плавления 1-го погонного метра электрода составит:

$$\tau = \frac{\pi d^2}{4\omega} \gamma = \frac{3,14 \cdot 0,205^2}{4 \cdot 4,75} \cdot 7800 = 54,2 \text{ мин.} \quad (42)$$

и в координатах (u)- τ необходимо построить график электрического режима плавки по напряжению.

В конце плавки на ряде марок сталей (сплавов) производится выведение усадочной раковины. Электрические параметры процесса для этого периода рассчитываются по следующей формуле:

$$P_{\gamma} = (0,5 \div 0,8) P, \text{ кВт} \quad (43)$$

На основании рассчитанных электрических характеристик выбирается трансформатор.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Методические указания к расчетной работе на тему: «Расчет конструкционных и технологических параметров установок электрошлакового переплава» / Составитель: Рябцев А.Д., – Донецк: ГВУЗ «ДОННТУ», 2014. – 16 с.
2. Ю.В.Латаш, Б.И.Медовар. Электрошлаковый переплав. М. «Металлургия», 1970, – 311 с.
3. П.П. Евсеев, А.Ф. Филиппов. Электропроводность фтористых шлаков. «Известия вузов. Черная металлургия», 1965, №5, с.70-73.
4. Б.И. Медовар, Л.М. Ступак. Электрошлаковые печи. К.: «Наукова думка», 1976, – 411 с.