Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Сибирский государственный индустриальный университет»

Кафедра металлургии цветных металлов
и химической технологии

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЛАЗМОТРОНОВ

Методические указания
к выполнению практических работ

Новокузнецк
2018

УДК 66.088(07)
О-753

Составители: Галевский Геннадий Владиславович Руднева Виктория Владимировна
Полях Ольга Анатольевна

Рецензент
доктор технических наук, профессор зав. кафедрой материаловедения, литейного и сварочного производства
Н.А. Козырев

О-753 Основы проектирования электродуговых плазмотронов [Электронный ресурс] : метод. указ. / Сиб. гос. индустр. ун-т, сост. : Г.В. Галевский, В.В. Руднева, О.А. Полях. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2018. – Систем. требования: Adobe Acrobat 7.0. – Загл. с экрана.

Представлена методика расчета электрических, теплотехнических и ресурсных характеристик электродугового плазмотрона. Приведены необходимые рекомендации и примеры выполнения расчетов, а также варианты заданий.

Предназначены для обучающихся по направлениям подготовки 18.03.01 Химическая технология, 18.04.01 Химическая технология, 22.03.02 Металлургия и 22.04.02 Металлургия.

Публикуется по решению комиссии по совершенствованию учебно-методической работы при совете ИМиМ (протокол № 21 от 20.12.2017).

© Сибирский государственный
дустриальный университет, 2018

Оглавление

Предисловие 6
1. Общее устройство и технические характеристики электродугового плазмотрона 7
2. Выбор плазмообразующей среды 11
3. Расчет характеристик электродугового плазмотрона 12
3.1 Расчет рабочих параметров и геометрических размеров электродуговой камеры 12
3.2 Расчет системы охлаждения 15
3.3 Расчет ресурса работы плазматрона 21
4. Задание для самостоятельной работы 24

Предисловие

Электродуговые плазматроны являются основным оборудованием используемым в конструкции много -, обычно трехструйных прямоточных вертикальных плазменных реакторов, используемых для различных технологических целей: плазмосинтеза многофункциональных соединений, плазменного модифицирования различных материалов, переработки отходов. Благодаря своей универсальности и способности генерировать плазменный поток с высокой удельной мощностью реакторы такого типа находят применение, как в пирометаллургических, так и в электротермических химико-технологических процессах. При проектировании такого рода процессов зачастую приходится решать различные проектно-конструкторские задачи, обеспечивающие повышение энерго– и ресурсосбережение при использовании плазменного оборудования.

Методические указания включают методику расчета электрических, теплотехнических и ресурсных характеристик электродугового плазмотрона, необходимые рекомендации и примеры выполнения расчетов, варианты заданий для самостоятельной работы. Методическое указание предназначено для обучающихся по направлениям подготовки 18.03.01, 18.04.01 Химическая технология, 22.03.02, 22.04.02 Металлургия, и могут быть использованы для практических занятий, курсового проектирования по дисциплинам «Оборудование химико-технологических производств», « Оборудование электротермических и углехимических производств», «Оборудование и объемно-планировочные решения современных предприятий цветной металлургии», «Рециклинговые технологии в производстве алюминия», «Технология наноматериалов», «Пирометаллургические процессы и оборудование», «Технология электротермических и углехимических производств». Методические указания также могут быть использованы при выполнении выпускных квалификационных работ.

1 Общее устройство и технические характеристики электродугового плазмотрона

Низкотемпературная плазма может генерироваться в электродуговых и высокочастотных плазмотронах, в тлеющем и коронном разрядах, в лазерных и других специальных устройствах [1]. Для реализации плазмометаллургических процессов переработки дисперсного сырья, когда отсутствуют ограничения по примесям продуктов эрозии электродов в продуктах, наиболее целесообразно применение электродуговых плазмотронов, основными достоинствами которых являются [1-4]:

– высокая единичная мощность (до 10 МВт) при сравнительно небольших габаритах;

– экономичность, за счет высоких теплового и электрического КПД, достигающих 80 %;

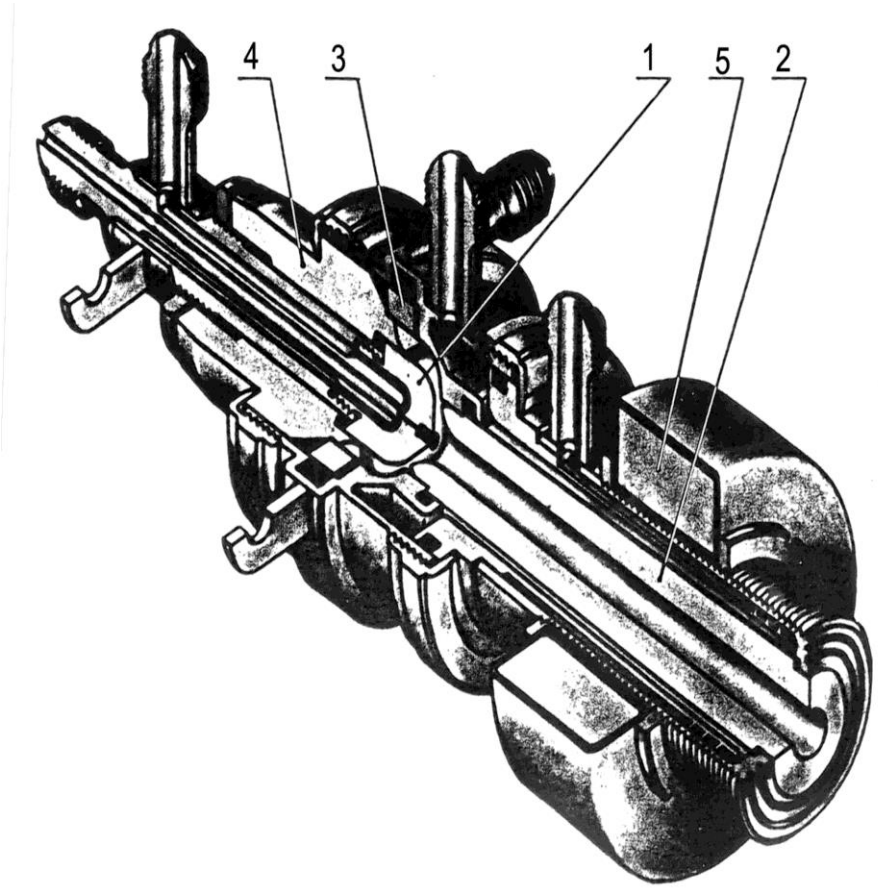
– отсутствие ограничений по роду плазмообразующего газа;

– длительный (сотни часов) ресурс работы;

– простота схемы электропитания и регулирования параметров работы.

Наиболее простыми и надежными в эксплуатации являются однокамерные плазмотроны с самоустанавливающейся длиной дуги. Недостатком этих плазмотронов является падающая вольт-амперная характеристика, требующая применения балластного сопротивления. Этого недостатка лишены плазмотроны с фиксированной длиной дуги, например, ЭДП-104А, конструкция которого представлена на рисунке 1. [1].

Плазмотрон обладает достаточной универсальностью. В его конструкции объединены схемы однокамерных плазмотронов с фиксированной и самоустанавливающейся длиной дуги. В зависимости от назначения плазмотрона, мощности, источника питания выходной электрод (анод) выбирается либо с постоянным по длине диаметром, либо ступенчатым. Дуга возбуждается между электродами при включении плазмотрона. Газовый поток выдувает дугу из межэлектродного пространства и вытягивает ее вдоль оси выходного электрода. Выходной электрод изготовляется из меди или немагнитной стали.



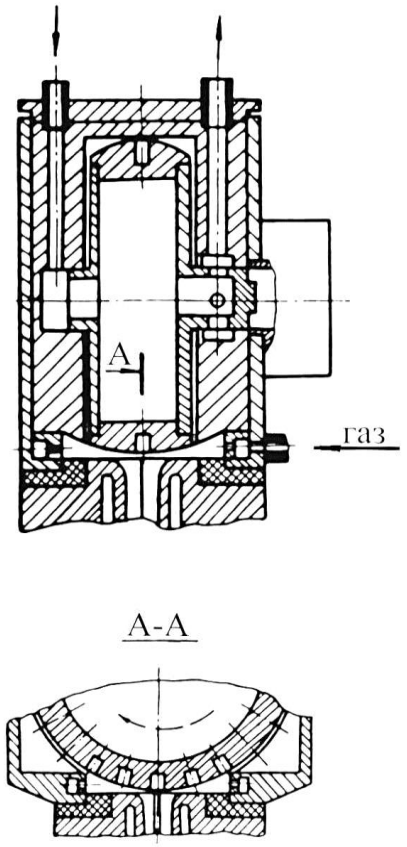
1 - внутренний электрод (катод); 2- выходной электрод (анод); 3- узел подачи рабочего газа; 4 – изолятор; 5 – постоянный магнит (соленоид)

Рисунок 1 – Конструкция плазмотрона ЭДП-104А

Внутренний электрод (катод) – из вольфрама, циркония, графита и других материалов, в зависимости от режимов работы и рода газа. В средах водорода и азота обычно применяется вольфрам. Температура плавления вольфрама, около 3500 ^{0}С, вполне достаточна для обеспечения значительной электронной эмиссии при температуре ниже точ-

ки плавления. Вольфрам легируется лантаном, иттрием, торием для уменьшения работы выхода [5].

Для увеличения времени непрерывной работы катода применяют многокомпозиционный электродный узел (рисунок 2).



1 – катодная вставка; 2 – медный водоохлаждаемый барабан

Рисунок 2 – Многокомпозиционный электродный узел

Электродные вставки из легированного вольфрама заделаны в медный водоохлаждаемый барабан равномерно по его окружности. Шаговый привод позволяет заменить отработанный электрод поворотом барабана на заданный угол без отключений дуги. Условия работы отдельной электродной ячейки одинаковы с условиями работы обычного торцевого электрода. В таблице 1.1 представлены технические характеристики плазмотрона ЭДП-104А [4].

Таблица 1 – Технические характеристики плазмотрона ЭДП-104А

Характеристика	Значение
1. Рабочий газ	воздух, азот, аргон, углекислый газ
2. Расход газа, кг/с	$(1\text{-}5)\cdot 10^{-3}$
3. Давление газа на выходе , Н/м^2	$(1\text{-}5)\cdot 10^{5}$
4. Тепловой КПД	0,6-0,8
5. Максимальный ток, А	250
6. Максимальное напряжение дуги, В аргон воздух, азот, углекислый газ	 60 400
7. Максимальная температура нагрева газов, К воздух, азот углекислый газ аргон	 5500 4500 8000
8. Ресурс вольфрамового катода (рабочий газ – азот, аргон), ч	100
9. Ресурс циркониевого катода (рабочий газ – воздух, углекислый газ), ч	30
10. Охлаждение электродов	водяное
11. Расход воды, кг/с	0,25
12. Давление воды, Н/м^2	$(4\text{-}6)\cdot 10^{5}$
13. Выходной диаметр электрода, м	$(5\text{-}10)\cdot 10^{-3}$
14. Габаритная длина, м	0,21
15. Масса, кг	1,45

2 Выбор плазмообразующей среды

Основные физико-химические характеристики плазмообразующих газов приведены в таблице 2 [3,5].

При выборе плазмообразующей среды необходимо учитывать следующие факторы:

– возможность достижения высоких значений энтальпии;
– возможность использования в качестве реагента;
– инертность по отношению к целевым продуктам;
– стоимость.

Таблица 2 – Физико-химические характеристики газов

Характеристика	Аргон	Азот	Водород	Гелий
Плотность, кг/м^3 - при н.у. - при Т=10^4 К, Р=1 атм.	 1,78 0,048	 1,25 0,018	 0,084 -	 0,178 -
Удельная теплоемкость при н.у., кДж/(кг · К)	0,52	1,04	14,2	5,26
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К): - при н.у. - при Т=0,5·10^4 К, Р=1 атм. - при Т=10^4 К, Р=1 атм.	 0,0163 0,125 0,42	 0,0243 0,701 2,63	 0,174 3,45 3,45	 0,151 - -
Электропроводность, Ом/м, при Т=10^4 К, Р=1 атм.	3650	2740	7400	6300
Энергия диссоциации, МДж/моль	-	0,94	0,43	-
Потенциал ионизации, В: - первый - второй	 15,76 27,62	 14,53 29,59	 13,59 -	 24,58 54,40
Энтальпия плазмы, кДж/кг · 10^{-3}: - при Т=0,5·10^4 К, Р=1 атм. - при Т=10^4 К, Р=1 атм. - при Т=1,5·10^4 К, Р=1 атм.	 2,53 6,15 34,6	 7,0 50,3 121,5	 310,2 460,9 1383	 10,5 49,9 74,4

Энтальпия является одним из основных параметров плазменного потока, в значительной мере определяющим технологические возможность реактора. Сопоставление зависимостей энтальпии плазмообразующих газов от температуры при атмосферном давлении, показывает, что энтальпия молекулярных газов (азота, водорода) при относительно низких температурах ($4 \cdot 10^3$-$1 \cdot 10^4$ К) в результате диссоциации молекул достигает высоких значений и почти на порядок превышает энтальпию одноатомных газов (аргон, гелий). Применение молекулярных газов позволяет достигать высоких значений теплового КПД плазмотронов, составляющего 60-80 % для водорода и азота, в то время как для плазмотронов, работающих на аргоне и гелии, этот показатель составляет 40-50 %. Наряду с этим стоимость аргона и гелия значительно превышает стоимость водорода и азота. По этим причинам использование в качестве плазмообразующих молекулярных газов представляется более предпочтительным.

Водород и азот в ряде процессов могут быть использованы одновременно в качестве теплоносителя и химического реагента. Следует также отметить взрывобезопасность азота, простоту конструкции и надежность в эксплуатации работающих на нем плазмотронов, например, ЭДП-104А.

3 Расчет характеристик электродугового плазмотрона

3.1 Расчет рабочих параметров и геометрических размеров электродуговой камеры

Заданная мощность плазмотрона – 50 кВт. Уравнение падающей ветви вольт-амперной характеристики плазмотрона, работающего на азоте [1]:

$$U = \frac{11044}{10^{0,03M}} \cdot \left(\frac{G}{I \cdot d_1} \right)^{1/3}, \qquad (1)$$

где U- напряжение, В;

M – молекулярная масса азота;

G – расход плазмообразующего газа, кг/с;

I – сила тока, А;

d_1 – диаметр дугового канала, м.

Диаметр дугового канала определяется [2]:

$$d_1 = 2{,}4 \cdot \left(\frac{G}{\pi \cdot \rho_{кр} \cdot a_{кр}} \right)^{1/2}, \qquad (2)$$

где $\rho_{кр}$- критическая плотность звука, кг/м^3;

$a_{кр}$ – критическая скорость звука, м/с.

Расход плазмообразующего газа для плазмотрона мощностью 50 кВт составляет 0,003 кг/с [3]; $\rho_{кр}$=0,128 кг/м^3, $a_{кр}$=988 м/с [5]. Тогда диаметр дугового канала, м:

$$d_1 = 2{,}4 \cdot \left(\frac{0{,}003}{\pi \cdot 0{,}128 \cdot 988} \right)^{1/2} = 6 \cdot 10^{-3}, \qquad (2\ а)$$

Рассчитаем напряжение по формуле (1) при I_1=250; I_2=200; I_3=150; I_4=100 А, В:

$$U_1 = \frac{11044}{10^{0{,}03 \cdot 28}} \cdot \left(\frac{0{,}003}{250 \cdot 6 \cdot 10^{-3}} \right)^{1/3} = 200, \qquad (1\ а)$$

$$U_2 = \frac{11044}{10^{0{,}03 \cdot 28}} \cdot \left(\frac{0{,}003}{200 \cdot 6 \cdot 10^{-3}} \right)^{1/3} = 215, \qquad (1\ б)$$

$$U_3 = \frac{11044}{10^{0{,}03 \cdot 28}} \cdot \left(\frac{0{,}003}{150 \cdot 6 \cdot 10^{-3}} \right)^{1/3} = 240, \qquad (1\ в)$$

$$U_4 = \frac{11044}{10^{0{,}03 \cdot 28}} \cdot \left(\frac{0{,}003}{100 \cdot 6 \cdot 10^{-3}} \right)^{1/3} = 270. \qquad (1\ г)$$

Мощность плазмотрона при данных значениях I и U, Вт:

$$P = I \cdot U, \qquad (3)$$

$$P_1 = I_1 \cdot U_1 = 250 \cdot 200 = 50000, \quad (3\ а)$$

$$P_2 = I_2 \cdot U_2 = 200 \cdot 215 = 43000, \quad (3\ б)$$

$$P_3 = I_3 \cdot U_3 = 150 \cdot 240 = 36000, \quad (3\ в)$$

$$P_4 = I_4 \cdot U_4 = 100 \cdot 270 = 27000. \quad (3\ г)$$

Для получения заданной мощности 50 кВт рабочими параметрами плазмотрона будут: I=250 А и U=200 В.

Длина дугового канала рассчитывается по формуле [2], м:

$$l_1 = \frac{0{,}49 \cdot I^{-0{,}32}}{\left(1 + 5{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot I\right)^{1{,}05}}, \quad (4)$$

$$l_1 = \frac{0{,}49 \cdot 250^{-0{,}32}}{\left(1 + 5{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 250\right)^{1{,}05}} = 3{,}6 \cdot 10^{-2}. \quad (4\ а)$$

Диаметр уступа [2], м:

$$d_2 = 2 \cdot d_1, \quad (5)$$

$$d_2 = 2 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 12 \cdot 10^{-3}. \quad (5\ а)$$

Длина уступа, м:

$$l_2 = 3 \cdot d_2, \quad (6)$$

$$l_2 = 3 \cdot 12 \cdot 10^{-3} = 3{,}6 \cdot 10^{-2}. \quad (6\ а)$$

Диаметр канала завихрителя [2], м:

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot n \cdot \rho \cdot \upsilon}}, \quad (7)$$

где n - число каналов;

ρ – плотность азота, кг/м^3;

υ – скорость азота в каналах завихрителя, м/с.

При атмосферном давлении скорость азота, как правило, составляет 150-200 м/с [2]. Принимаем, υ=200 м/с, n=4. Тогда d_3, м:

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0{,}003}{\pi \cdot 4 \cdot 1{,}25 \cdot 200}} = 2 \cdot 10^{-3}, \qquad (7\ а)$$

Тепловой КПД плазмотрона определяется [1,2]:

$$\eta = \left[1 + 5{,}85 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{I^2}{G \cdot d_1}\right)^{0,27} \cdot \left(\frac{G}{d_1}\right)^{-0,27} \cdot (P \cdot d_1)^{0,3} \cdot \left(\frac{l_1}{d_1} + \frac{l_2}{d_2}\right)^{0,5}\right]^{-1}, \qquad (8)$$

где P=10^5 Па – давление азота на выходе из плазмотрона.

$$\eta = [1 + 5{,}85 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{250^2}{0{,}003 \cdot 6 \cdot 10^{-3}}\right)^{0,27} \cdot \left(\frac{0{,}003}{6 \cdot 10^{-3}}\right)^{0,27} \times$$
$$\times \left(10^5 \cdot 6 \cdot 10^{-3}\right)^{0,3} \left(\frac{3{,}6 \cdot 10^{-2}}{6 \cdot 10^{-3}} + \frac{3{,}6 \cdot 10^{-2}}{12 \cdot 10^{-3}}\right)^{0,5}]^{-1} = 0{,}6 \qquad (8\ а)$$

3.2 Расчет системы охлаждения

При работе плазмотрона в катод и анод передается значительное количество теплоты через опорные пятна дуги. Суммарные тепловые потери составят, Вт:

$$Q_П = U \cdot I \cdot (1 - \eta), (9)$$

$$Q_П = 200 \cdot 250 \cdot (1 - 0{,}6) = 2 \cdot 10^4. \qquad (9\ а)$$

Примем [2], что узлы плазмотрона охлаждаются технической водой с начальной температурой $T_н$=300 К и конечной температурой $T_к$=320 К; вода проходит последовательно по охлаждающим трактам катода и анода. Необходимое количество охлаждающей воды, кг/с:

$$G_в = \frac{Q_п}{c_в \cdot (T_к - T_н)}, \qquad (10)$$

где $c_в$=4,18·10^3 Дж/(кг·К) [4] – теплоемкость воды при средней температуре.

$$G_в = \frac{2 \cdot 10^4}{4{,}18 \cdot 10^3 \cdot (320 - 300)} = 0{,}25. \qquad (10\ а)$$

Чтобы обеспечить интенсивный теплообмен и предотвратить закипание воды, принимаем турбулентный режим течения жидкости. Рекомендуемое значение числа Рейнольдса Re=19·10^4 [2].

$$\mathrm{Re} = \frac{w \cdot d}{\nu}, \qquad (11)$$

где w – линейная скорость воды, м/с;

d – диаметр канала, м;

ν – кинематический коэффициент вязкости воды, м^2/с.

Уравнение расхода воды:

$$G_в = w \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \rho, \qquad (12)$$

где ρ –плотность воды при средней температуре, кг/м^3.

Решая совместно уравнения (11). (12) и принимая значения ρ и ν по данным [5], получим, м:

$$d = \frac{4 \cdot G_в}{\pi \cdot \rho \cdot \upsilon \cdot \mathrm{Re}}, \qquad (13)$$

$$d = \frac{4 \cdot 0{,}25}{\pi \cdot 994 \cdot 0{,}65 \cdot 10^{-6} \cdot 19 \cdot 10^4} = 5 \cdot 10^{-3}. \qquad (13\ а)$$

Определим температуру стенки анода. Считаем, что вся теряемая в плазмотроне теплота передается к охлаждающей жидкости через стенку анода. Тогда плотность теплового потока через стенку составит, Вт/м^2:

$$q = \frac{Q_п}{\pi \cdot (d_1 \cdot l_1 + d_2 \cdot l_2)}, \qquad (14)$$

$$q = \frac{2 \cdot 10^4}{\pi \cdot \left(6 \cdot 10^{-3} \cdot 3{,}6 \cdot 10^{-2} + 12 \cdot 10^{-3} \cdot 3{,}6 \cdot 10^{-2}\right)} = 9{,}8 \cdot 10^6, \qquad (14а)$$

Тепловой поток от газа к стенке будет передаваться конвекцией (рисунок 3).

$$q = \alpha_1 \cdot (T_1 - T_{ст1}), \qquad (15)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от газа к стенке, Вт/(м^2·К);

T_1 – температура газа, К;

$T_{ст1}$ – температура стенки со стороны газа, К.

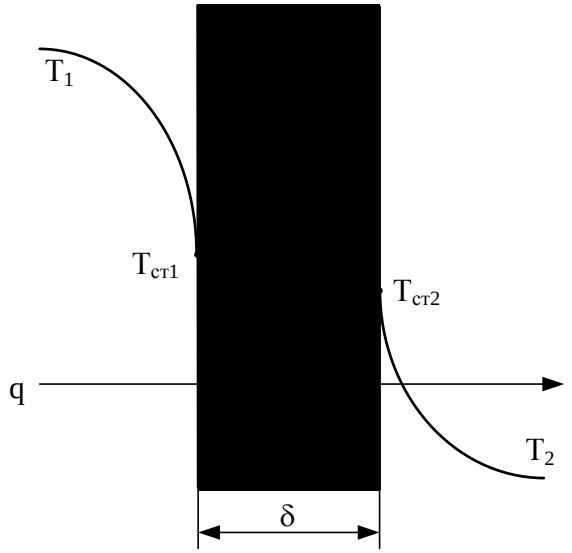


Рисунок 3 – Схема расчета температуры стенки анода

Через стенку тепловой поток передается теплопроводностью:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (T_{ст1} - T_{ст2}), \qquad (16)$$

где λ - коэффициент теплопроводности материала стенки, для меди $\lambda = 4 \cdot 10^2$ Вт/(м·К) [5];

δ - толщина стенки, принимаем $\delta = 1 \cdot 10^{-2}$ м [2];

$T_{ст2}$ – температура стенки со стороны воды, К.

Тепловой поток от стенки к воде передается конвекцией:

$$q = \alpha_2 \cdot (T_{ст2} - T_2), \qquad (17)$$

где α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки к воде, Вт/(м^2·К);

T_2 – средняя температура охлаждающей воды, К.

$$T_2 = \frac{1}{2} \cdot (T_к - T_н), (18)$$

$$T_2 = \frac{1}{2} \cdot (320 - 300) = 310. \qquad (18\ а)$$

$$\alpha_2 = Nu \cdot \frac{\lambda_ж}{d}, \qquad (19)$$

где Nu – число Нуссельта;

$\lambda_ж$ – коэффициент теплопроводности жидкости (воды),

$\lambda_ж = \lambda_в = 0{,}63$ Вт/(м·К) при 310 К [5].

Для турбулентного режима течения:

$$Nu = 0{,}023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}, \qquad (20)$$

где Pr – число Прандтля, при средней температуре жидкости (воды) 310 К, для воды Pr=4,32 [5].

$$Nu = 0{,}023 \cdot (19 \cdot 10^4)^{0,8} \cdot 4{,}32^{0,4} = 690, \qquad (20\ а)$$

$$\alpha_2 = 690 \cdot \frac{0{,}63}{5 \cdot 10^{-3}} = 86940. \qquad (19\ а)$$

Из формулы (17) определим $T_{ст2}$:

$$T_{ст2} = \frac{q}{\alpha_2} + T_2, \qquad (21)$$

$$T_{ст2} = \frac{9{,}8 \cdot 10^6}{86940} + 310 = 422, \qquad (21\ а)$$

Из формулы (16) находим $T_{ст1}$:

$$T_{ст1} = \frac{q \cdot \delta}{\lambda} + T_{ст2}, \quad (22)$$

$$T_{ст2} = \frac{9{,}8 \cdot 10^6 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 10^2} + 422 = 667. \quad (22\ а)$$

Определим критическую плотность теплового потока, соответствующую началу кипения охлаждающей воды:

$$q_{кр} = \alpha_2 \cdot (T_{кр} - T_2), \quad (23)$$

где $T_{кр}$ – температура кипения воды, К.
Принимаем давление охлаждающей воды P=10^6 Па, тогда $T_{кр}$=453 К [5].

$$q_{кр} = 86940 \cdot (453 - 310) = 12{,}4 \cdot 10^6. \quad (23\ а)$$

Так как $q_{кр}$>q, то охлаждающая вода не закипит.
Определим гидравлическое сопротивление плазмотрона по воде, Па [2]:

$$\Delta P = \frac{\rho \cdot w^2}{2} \cdot \left(\lambda_{тр} \cdot \frac{l}{d} + \sum \xi \right), \quad (24)$$

где $\lambda_{тр}$ – линейный коэффициент сопротивления трению;
l – длина охлаждающих трактов, м;
$\sum\xi$ - сумма местных сопротивлений;
w – скорость жидкости в охлаждающих трактах, м/с.
Для турбулентного режима течения:

$$\lambda_{тр} = 0{,}316 \cdot Re^{-0{,}25}, \quad (25)$$

$$\lambda_{тр} = 0{,}316 \cdot \left(19 \cdot 10^4\right)^{-0{,}25} = 0{,}0151. \quad (25\ а)$$

Скорость жидкости определим из формулы (2.12), м/с:

$$w = \frac{4 \cdot G_в}{\pi \cdot d^2 \cdot \rho}, \quad (26)$$

$$w = \frac{4 \cdot 0{,}25}{\pi \cdot \left(5 \cdot 10^{-3}\right)^2 \cdot 994} = 12{,}8. \quad (26\ а)$$

Примем l=1,5 м [2] и $\sum\xi$=10 [4], тогда ΔP, Па:

$$\Delta P = \frac{994 \cdot 12{,}8^2}{2} \cdot \left(0{,}0151 \cdot \frac{1{,}5}{5 \cdot 10^{-3}} + 10\right) = 1{,}1 \cdot 10^6. \quad (24\ а)$$

Общее давление воды, подводимой для охлаждения плазмотрона, Па:

$$P = P_0 + \Delta P, \quad (27)$$

где P_0 – давление воды на выходе из плазмотрона, Па.

$$P = 10^6 + 1{,}1 \cdot 10^6 = 2{,}1 \cdot 10^6. \quad (27\ а)$$

Мощность, затрачиваемая на перекачивание охлаждающей воды, кВт:

$$N = \frac{G_в \cdot P}{10^6 \cdot \eta_н}, \quad (28)$$

где $\eta_н$ – КПД насоса, принимаем $\eta_н$=0,8 [2].

$$N = \frac{0{,}25 \cdot 2{,}1 \cdot 10^6}{10^6 \cdot 0{,}8} = 0{,}66. \quad (28\ а)$$

Несмотря на достаточно высокое гидравлическое сопротивление плазмотрона, мощность, затрачиваемая на перекачивание охлаждающей воды, незначительна, по сравнению с тепловыми потерями в плазмотроне.

3.3 Расчет ресурса работы плазмотрона

Ресурс работы плазмотрона принимается равным меньшему значению ресурса работы одного из электродов.

Определим ресурс работы анода. Для этого заменим сложный профиль изношенной части анода в месте привязки электрической дуги за уступом треугольником ABC (рисунок 4).

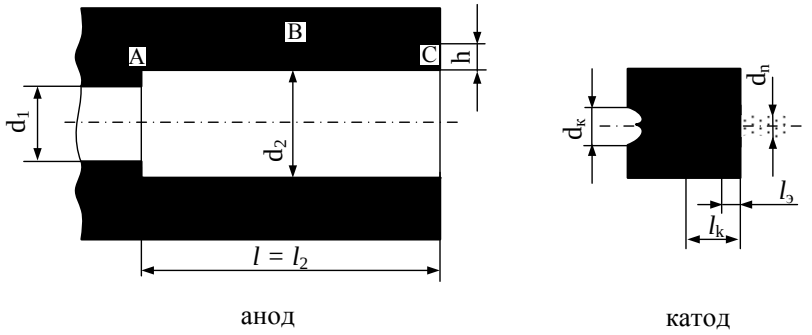


Рисунок 4 – Расчет электродов

Объем материала, удаленного в результате эрозии, м^3:

$$V_э = 0{,}5 \cdot h \cdot \pi \cdot l \cdot (d_2 + h). \qquad (29)$$

Примем $l = l_2$; h=10^{-2} м (обозначения на рисунке 4), тогда:

$$V_э = 0{,}5 \cdot 10^{-2} \cdot \pi \cdot 3{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot \left(12 \cdot 10^{-3} + 10^{-2}\right) = 6{,}84 \cdot 10^{-6}. \qquad (29\ а)$$

Продолжительность непрерывной работы анода из меди составит:

$$\tau_a = \frac{\rho_э \cdot V_э}{G_э \cdot I}, \qquad (30)$$

где $\rho_э$ – плотность меди, $\rho_э$=8,9·10^3 кг/м^3 [4];

$G_э$ – удельная эрозия электрода, $G_э$=3 · 10^{-11} кг/Кл (по экспериментальным данным);

I – сила тока дуги, А.

$$\tau_a = \frac{8{,}9 \cdot 10^3 \cdot 6{,}84 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-11} \cdot 250} = 8{,}11 \cdot 10^6\ \text{с, 2253 ч (94 сут.)} \qquad (30\ а)$$

Определим ресурс катода. В качестве материала катода выбираем вольфрам [2,3]. Диаметр катодной вольфрамовой вставки [2], м:

$$d_к = \frac{1{,}3 \cdot 10^{-4} \cdot I^{0,5}}{1 - 2{,}15 \cdot 10^{-2} \cdot I^{0,5}}, \qquad (31)$$

$$d_к = \frac{1{,}3 \cdot 10^{-4} \cdot 250^{0,5}}{1 - 2{,}15 \cdot 10^{-2} \cdot 250^{0,5}} = 3 \cdot 10^{-3}. \qquad (31\ а)$$

Длина вставки должна быть меньше либо равной диаметру, принимаем $l_к$=0,003 м. Допустимая глубина эрозии катода, м:

$$l_э = 0{,}3 \cdot l_к \qquad (32)$$

$$l_э = 0{,}3 \cdot 0{,}003 = 9 \cdot 10^{-4}. \qquad (32\ а)$$

Диаметр образующегося в катоде под воздействием дуги кратера равен диаметру привязки дуги, м:

$$d_п = B \cdot I^{0,5}, \qquad (33)$$

где B – коэффициент, равный для азота $1{,}3 \cdot 10^{-4}$ [2].

$$d_п = 1{,}3 \cdot 10^{-4} \cdot 250^{0,5} = 2 \cdot 10^{-3}. \qquad (33\ а)$$

Объем материала, удаленного в результате эрозии, м^3:

$$V_э = \frac{\pi \cdot d_п^2 \cdot l_э}{4}, \qquad (34)$$

$$V_э = \frac{\pi \cdot \left(2 \cdot 10^{-3}\right)^2 \cdot 9 \cdot 10^{-4}}{4} = 2{,}8 \cdot 10^{-9}. \qquad (34\ а)$$

По формуле (2.30) рассчитаем время непрерывной работы катода, учитывая, что для вольфрама $\rho_э$=19,34·10^3 кг/м^3 [3], $G_э$=2,5 · 10^{-13} кг/Кл (по экспериментальным данным):

$$\tau_к = \frac{19{,}34 \cdot 10^3 \cdot 2{,}8 \cdot 10^{-9}}{2{,}5 \cdot 10^{-13} \cdot 250} = 8{,}66 \cdot 10^5 \text{с, } 240{,}6 \text{ ч (10 сут)} \qquad (34\ б)$$

Так как $\tau_к < \tau_а$, то ресурс работы плазмотрона будет определяться ресурсом работы катода и составит 240,6 ч.

3.4 Расчет среднемассовой температуры плазменной струи на выходе из анода плазмотрона

Вычисляется удельная энтальпия плазмообразующего газа мДж/кг

$$Н_{уд} = \frac{P \cdot \eta}{G}, \qquad (33)$$

где

P – заданная мощность, кВт

η – тепловой КПД плазмотрона, доли единицы

G – массовый переход плазмообразующего газа, кг/с

$$Н_{уд} = \frac{50 \cdot 0{,}6}{3 \cdot 10^{-3}} = 10{,}0 \text{ мДж/кг}$$

Средняя массовая температура определяется по таблице в зависимости от энтальпии и составляет 5700 К.

Таблица 3 – Зависимость температуры азота от энтальпии

Энтальпия азота, кДж/кг	Температура, К
1373	1250
1680	1500
1995	1750
2314	2000
2572	2200
2832	2400
3093	2600
3356	2800
3620	3000
3885	3200
4152	3400
4423	3600
4698	3800
4982	4000
5282	4200
5606	4400
5967	4600
6383	4800
6877	5000
7480	5200
8229	5400
9166	5600

4 Задание для самостоятельной работы

Задание для самостоятельной работы включает 27 вариантов и предполагает выполнение всех необходимых расчетов для электродугового плазмотрона ЭДП-104 А по заданным значениям мощности и массовому расходу плазмообразующего газа (таблица 4).

Таблица 4 – Варианты заданий для самостоятельной работы

№	P, кВт	G, кг/с
1	10,0	0,0025
2	12,0	0,0025
3	14,0	0,0025
4	16,0	0,0025
5	18,0	0,0025
6	20,0	0,0028
7	22,0	0,0028
8	24,0	0,0028
9	26,0	0,0028
10	28,0	0,0028
11	30,0	0,0028
12	32,0	0,003
13	34,0	0,003
14	36,0	0,003
15	38,0	0,003
16	40,0	0,003
17	42,0	0,003
18	44,0	0,003
19	46,0	0,0035
20	48,0	0,0035
21	52,0	0,0035
22	54,0	0,0035
23	56,0	0,0038
24	58,0	0,0038
25	60,0	0,004
26	62,0	0,004
27	64,0	0,004

Библиографический список

1. Электродуговые плазмотроны / под.ред. М.Ф. Жукова.- Новосибирск : ИТФ СО АН СССР, 1980. – 84 с.

2. Пархоменко В.Д. Технология плазмохимических производств: учеб. пособие / В.Д. Пархоменко, П.Н. Цибунов, Ю.Н. Краснокутский. – Киев : Выща школа, 1991. – 255 с.

3. Галевский Г.В. Технология плазмометаллургического производства наноматериалов : учебное пособие : в 2 т. /Г.В. Галевский, Т.В. Киселева, О.А. Полях, В.В. Руднева – Т.1 Основы проектирования плазмометаллургических реакторов и процессов. – М. : Флинта: Наука, 2008- 228 с.

4. Рудской А.И. Нанотехнологии в металлургии.- СПБ.: Наука, 2007 – 186 с.

5. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М. : Наука, 1972. – 720 с.