



УДК 669.187.58.001.2

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЁТА ОСНОВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННЫХ КОВШЕЙ-ПЕЧЕЙ

**М. Л. Жадкевич, В. А. Шаповалов, Г. А. Мельник,
М. С. Приходько, А. А. Ждановский, Д. М. Жиров**

Разработана методика расчёта основных энергетических параметров плазменных ковшей-печей. Методика даёт возможность определить мощность и основные электрические характеристики плазменных источников нагрева для ковшей-печей ёмкостью от 30 до 100 т в широком диапазоне технологических режимов в зависимости от требуемой технологией скорости нагрева металлического расплава.

Procedure of calculation of main power parameters of plasma ladles-furnaces was developed. This procedure makes it possible to determine the power and main electric characteristics of plasma heat sources for ladles-furnaces of capacity from 30 to 100 t within the wide range of technological parameters depending on the metal melt heating rate required by technology.

Ключевые слова: *плазмотроны; плазменные ковши-печи; плазмообразующий газ; металлический расплав; вольт-амперные характеристики; активная удельная мощность; КПД плазмотронов; эффективный термический параметр; энергетические параметры*

Плазменная внепечная обработка стали (ПВОС) — новая генерация технологии внепечной обработки, в которой компенсация тепловых потерь или подогрев шлакового и металлического расплава осуществляется с помощью низкотемпературной плазмы в плазменных ковшах-печах, оборудованных трёхфазными плазменными нагревательными комплексами переменного тока мощностью 3,5...6,0 МВт, обеспечивающими скорость нагрева стали в пределах 1,0...5,2 °С / мин.

Достоинством плазменных ковшей-печей является то, что, по сравнению с существующими за рубежом аналогами, они позволяют расширить энергетические, технологические и металлургические возможности комплексной внепечной обработки стали, снизить удельный расход электроэнергии, продолжительность подогрева, износ футеровки ковшей, расход графитированных электродов. Технология ПВОС способствует активному использованию газовой и шлаковой фаз, исключению загрязнения металла углеродом, азотом и водородом,

эффективной очистке металла от неметаллических примесей, улучшению качества получаемой стали, экологии технологического процесса.

Исследования, которые проводились в Институте электросварки им. Е. О. Патона, показали, что именно использование плазменных источников теплоты и активированных в плазме газов и шлаков обеспечивает оптимальные условия протекания восстановительно-рафинирующих реакций получения чугуна, стали, ферросплавов высокого качества.

Для создания плазменной технологии и оборудования, которые могут быть предложены заводам для внедрения, необходимо разработать инженерные методы расчёта энергетических параметров, исследовать эти показатели в широком диапазоне технологических режимов и изучить особенности плазменной выплавки и рафинирования металлов активированными в плазме газами и шлаками.

Одной из основных задач, стоящих перед разработчиками технологии и оборудования внепечной обработки, является определение мощности, требуемой для нагрева металла с заданной скоростью.

При заданных массе нагреваемого металла и скорости нагрева металлического расплава опреде-



лим общую мощность W^Σ (Вт) плазмотронов по формуле

$$W^\Sigma = W_{уд} m v, \quad (1)$$

где m — масса металла в ковше, т; $W_{уд}$ — активная удельная мощность — универсальный параметр для расчета энергетических режимов работы ковша-печи определённой ёмкости, кВт · ч / (т · °С). Значения этого параметра находятся в пределах 0,3...0,6 кВт · ч / (т · °С) [1] и зависят от емкости ковша, конструктивных особенностей агрегата, КПД плазмотронов, температуры ковша на момент начала заливки стали, количества присаживаемых легирующих элементов и т. д. При этом необходимо учесть, что с увеличением ёмкости ковше-печи значения параметра $W_{уд}$ уменьшаются; v — заданная скорость нагрева металлического расплава, °С/мин.

Из литературы [2,3] известно, что наиболее надёжная работа плазмотронов обеспечивается в пределах длин дуг 300...600 мм. При работе как на аргоне, так на азоте и их смесях вольт-амперные характеристики (ВАХ) достаточно пологие, а усреднённое напряжение дуги U_d в пределах силы тока от 2 до 8 кА составляет для аргона 120...150 В. Для дальнейшего расчёта усреднённое напряжение дуги принимаем равным 150 В.

Зная общую мощность плазмотронов, полученную по формуле (1), рассчитываем приблизительную силу тока I_d (А) одного плазмотрона, которая в дальнейшем будет использована в качестве реперной для расчёта области вольт-амперных характеристик дугового разряда плазмотрона во всём диапазоне технологических режимов ПВОС:

$$I_d = W^\Sigma / z \cdot U_d, \quad (2)$$

где z — количество плазмотронов.

Принимая во внимание то, что в процессе выполнения технологических операций возможно регулирование силы тока в пределах 1...3 номинального его значения, определим область силы тока одного плазмотрона для расчётных ВАХ:

$$I_{d_{\min}} \geq I_d / 3; \quad I_{d_{\max}} \leq 3 \cdot I_d. \quad (3)$$

Исходя из сказанного выше, рассчитаем область ВАХ для всего диапазона технологических режимов, принимая во внимание значения длин дуг в пределах 300...600 мм согласно работе [2].

Вольт-амперные характеристики дугового разряда плазмотрона при работе его в ковшах-печах полого возрастающие, крутизна их составляет $(0,5...0,7) \cdot 10^{-2}$ В / А при использовании в качестве плазмообразующего газа аргона и $(0,7...1,0) \cdot 10^{-2}$ В / А при использовании в качестве плазмообразующего газа азота или смеси его с аргонem, или при горении дуги в пусковой период, когда в плавильном пространстве находится практически воздух повышенной влажности.

Вольт-амперные характеристики дуг трёхфазной группы плазмотронов при использовании в качестве плазмообразующего газа аргона и горении их в установившемся режиме описываются эмпирической зависимостью

$$U_{д_{ар}} = 1,1 [(b I_d^m L_d) + l_3 E_c + 10], \quad (4)$$

где b — коэффициент, равный 1,65–2,0; m — показатель степени, равный 0,065–0,075; L_d — длина дуги, см; l_3 — заглубление электрода в сопло, мм; E_c — градиент напряжения части столба дуги, находящейся в сопловом канале, В/мм.

При использовании в качестве плазмообразующего газа азота или смеси его с аргонem, а также других газов или их смесей, при горении дуги в пусковом режиме в атмосфере влажного воздуха и т. д. напряжение дуги $U_{д_{см}}$ рассчитывается по формуле

$$U_{д_{см}} = U_{д_{ар}} \cdot [10^2 \cdot \{ \Gamma \}]^n, \quad (5)$$

где Γ — объёмная доля газа в смеси его с аргонem; n — показатель степени; при работе с использованием воздуха, азота значения n колеблются в пределах 0,12–0,17; при использовании гелия — 0,05–0,08, а водорода — 0,32–0,35.

Рассчитав и построив ВАХ, выбираем оптимальные значения силы тока и напряжения дуги при расстоянии между плазмотронами $L_{пл}$ и длине дуги, при которых гарантируется надёжная работа плазмотронов. Оптимальные значения $L_{пл}$ и L_d (мм) находятся в пределах:

$$I_d^{k_1} < L_{пл} < I_d^{k_2}; \quad (6)$$

$$I_d^{k_3} < L_d < I_d^{k_4}, \quad (7)$$

где $k_1 = 0,68$, $k_2 = 0,75$, $k_3 = 0,63$ –0,65, $k_4 = 0,7$ –0,72 — показатели степени.

Из совокупности ВАХ дуг исследуемых технологических режимов эксплуатации плазменных ковше-печей (режимов запуска и установившихся режимов) выбираем диапазоны силы тока и напряжения и определяем основные технические характеристики системы плазмотрон–короткая цепь–источник питания. Необходимыми условиями устойчивости указанной системы и стабильности горения дуги являются: падающая внешняя ВАХ системы плазмотрон–короткая цепь–источник питания с крутизной, которая обеспечивается её внутренним сопротивлением не менее 0,025 Ом; отношение напряжения незамкнутой системы плазмотрон–короткая цепь–источник питания к напряжению дуги во всём диапазоне технологических режимов должно составлять не менее двух.

Для определения достоверности значения общей мощности плазмотронов, рассчитанной по формуле (1), рассмотрим тепловой баланс ковша-печи с конкретными геометрическими размерами и конструктивными особенностями его узлов. Тепловая энергия, генерируемая дугами плазмотронов, расходу-



ется на нагрев металлического расплава и компенсацию общих потерь теплоты.

Общие потери теплоты Q^{Σ} (Вт) при нагревании металлического расплава в ковше-печи составят:

$$Q^{\Sigma} = \sum_1^z Q_{пл.i} + Q_{\phi} + Q_{кр} + Q_{бок.к} + Q_{г}, \quad (8)$$

где $\sum_1^z Q_{пл.i}$ — суммарные тепловые потери в плазмотронах и водоохлаждаемых узлах крепления их на крышке, Вт; Q_{ϕ} — тепловая энергия, расходуемая на нагрев футеровки ковша от температуры, при которой металл заливался в ковш, до рабочей температуры, Вт; $Q_{кр}$ — тепловые потери от крышки ковша в окружающее пространство, Вт; $Q_{бок.к}$ — тепловые потери от стенок ковша и его днища в окружающее пространство, Вт; $Q_{г}$ — тепловые потери с отходящими газами, Вт.

Рассчитаем отдельные статьи этого уравнения.

Суммарные тепловые потери в плазмотронах и водоохлаждаемых узлах крепления их на крышке:

$$\sum_1^z Q_{пл.i} = z Q_{пл.i}, \quad (9)$$

где $Q_{пл.i}$ — тепловые потери в плазмотроне, которые можно представить в виде

$$Q_{пл.i} = Q_{с.i} + Q_{э.i} + Q_{к.i} + Q_{кор.i}, \quad (10)$$

где $Q_{с.i}$, $Q_{э.i}$, $Q_{к.i}$, $Q_{кор.i}$ — тепловые потери в сопле, электроде, катоде и корпусе плазмотрона соответственно, Вт.

Тепловые потери в сопле, электроде и катоде определяются по формулам:

$$Q_{с.i} = I_{д} q_{с}^*; \quad (11)$$

$$Q_{э.i} + Q_{к.i} = I_{д} q_{э}^*, \quad (12)$$

где $q_{с}^*$ и $q_{э}^*$ — эффективные термические параметры сопла и электрода, значения которых при работе на аргоне составляют соответственно 12...15 и 6...8 Вт/А. В случае использования в качестве плазмообразующих газов смесей аргона с гелием, азотом, водородом или при горении дуги в атмосфере этих газовых смесей $q_{с.н}^*$ и $q_{э.н}^*$ определяются по формулам [4, 5]:

$$q_{с.н}^* = r \{ I \} + q_{с}^*; \quad (13)$$

$$q_{э.н}^* = d \{ I \} + q_{э}^*, \quad (14)$$

где r , d — коэффициенты, зависящие от рода плазмообразующего газа, Вт/А. При использовании аргоно-гелиевых смесей $r = 8...9$ Вт/А, $d = 9...10$ Вт/А; смесей аргона с азотом или воздухом — $r = 13...14$ Вт/А, $d = 18...19$ Вт/А; аргоно-водородных смесей — $r = 130...150$ Вт/А, $d = 130...140$ Вт/А.

Тепловые потери в корпусе (или в кессоне) и водоохлаждаемых узлах крепления плазмотрона на крышке зависят от плотности теплового потока, передаваемого от дуг, расплавленного металла и футеровки охлаждающей воде.

Тепловые потери в корпусе плазмотрона рассчитываем по формуле

$$Q_{кор.i} = q_{кор} F, \quad (15)$$

где $q_{кор}$ — плотность теплового потока, Вт/м²; F — площадь боковой поверхности корпуса плазмотрона (или его кессона), м². Значения $q_{кор}$ по данным литературных источников [6, 7] и наших экспериментов колеблются в пределах $(1,4...6,3) \cdot 10^5$ Вт/м² и зависят от степени тепловой изоляции корпуса от плавильного пространства.

После расчёта суммарных тепловых потерь в плазмотронах необходимо проверить, как коррелируются полученные результаты с литературными и экспериментальными данными:

$$\sum_1^z Q_{пл} = (0,15...0,30) I_{д} U_{д} z. \quad (16)$$

Если полученные данные находятся вне пределов, указанных в уравнении (16), то расчёт необходимо повторить, уточнив расчётные коэффициенты.

Тепловая энергия, расходуемая на нагрев футеровки ковша:

$$Q_{\phi} = q f, \quad (17)$$

где f — площадь контактного теплообмена между расплавленным металлом и боковой поверхностью ковша, м²; q — удельные тепловые потери, Вт/м², определяемые как

$$q = 1,189 \lambda (T - T_0) / (\pi a)^{0,5}, \quad (18)$$

где λ — коэффициент теплопроводности футеровки, Вт/(м · °С); T — рабочая температура футеровки (1000...1200 °С); T_0 — температура футеровки, при которой металл заливается в ковш, (400...60 °С); a — коэффициент температуропроводности футеровки, м²/ч.

Тепловые потери от крышки ковша с водоохлаждаемым сводом в окружающую среду можно рассчитать по формуле

$$Q_{кр1} = \alpha_{кр} F_{кр1} (t_{кр1} - t_{в}), \quad (19)$$

где $\alpha_{кр}$ — коэффициент теплоотдачи от крышки в окружающую среду, Вт/(м² · °С); $F_{кр1}$ — площадь наружной поверхности крышки, м²; $t_{кр1}$ — температура наружной поверхности крышки, °С; $t_{в}$ — температура воздуха в цеховом помещении, °С.

По данным работы [6] $\alpha_{кр} = (28...48)$ Вт/(м² · °С) при $t_{в} = 20$ °С и $t_{кр1} = 400...500$ °С.

Тепловые же потери от крышки ковша с водоохлаждаемым сводом поверхностью $F_{кр2}$ (м²) ко-



леблются в пределах $(3,5 \cdot 10^4) \dots (1,1 \cdot 10^5)$ Вт/м² и зависят от периода плавки [8]. В среднем за плавку тепловые потери от водоохлаждаемой крышки принимают $(7,5 \dots 8,7) \cdot 10^4$ Вт/м². Тогда тепловые потери от крышки ковша с водоохлаждаемым сводом определяют по формуле

$$Q_{кр_2} = (7,5 \dots 8,7) \cdot 10^4 F_{кр_2} \quad (20)$$

Потери теплоты от стенок и днища ковша в окружающую среду рассчитываем по формуле

$$Q_{бок.к} = \alpha_{ков} F_{ков} (t_{ков} - t_{в}), \quad (21)$$

где $\alpha_{ков}$ — коэффициент теплоотдачи от наружных стенок ковша в окружающую среду, Вт/(см² · °С); $F_{ков}$ — площадь наружной поверхности ковша, м²; $t_{ков}$ — температура наружной поверхности ковша, °С.

При $t_{в} = 20$ °С, $t_{ков} = 100 \dots 200$ °С рекомендуем для расчёта принять $\alpha_{ков}$ равным 16...23 Вт/(м² · °С).

Тепловые потери с отходящими газами можно определить по формуле

$$Q_{г} = (0,09 \dots 0,10) \sum_1^z I_{д} U_{д} \quad (22)$$

Тепловая энергия, передаваемая непосредственно расплавленному металлу, представляет собой разность между тепловой энергией, генерируемой дугами плазмотронов, и суммарными потерями теплоты. Уравнение для определения тепловой энергии, передаваемой металлу с учётом реальных тепловых потерь, имеет вид

$$Q_{м} = W^{\Sigma} - Q^{\Sigma}, \quad (23)$$

где $W^{\Sigma} = \sum_1^z I_{д} U_{д}$.

Проверим, коррелируется ли заданная скорость нагрева металла в ковше v (°С/мин) с реальной

скоростью v_p , рассчитанной с учётом реальной тепловой энергии, передаваемой металлу:

$$v_p = Q_{м} / (60 m c_{ж}), \quad (24)$$

где $c_{ж}$ — массовая теплоёмкость металла в жидком состоянии, Вт·ч/(кг · °С); для стали $c_{ж} = 0,255$ Вт·ч/(кг · °С).

Если полученное значение реальной скорости будет отличаться от заданного и принятого для расчёта, следует выбрать новые параметры дуги на ее ВАХ и повторить расчёт, начиная с уравнения (9).

Расчет можно считать завершённым, если скорость нагрева металла, рассчитанная по уравнению (24), будет равна заданной скорости или превышать её не более чем на 5%.

1. *Некоторые* возможности обработки стали в дуговых и плазменных ковшах-печах // Г. А. Мельник, О. С. Забарилло, М. Л. Жадкевич и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2002. — №1. — С. 26–31.
2. *Перспективы* использования плазменных источников теплоты в агрегатах внепечной обработки стали. Сообщение 1. // Г. А. Мельник, О. С. Забарилло, А. А. Ждановский и др. // Там же. — 1991. — №2. — С. 60–66.
3. *Перспективы* использования плазменных источников теплоты в агрегатах внепечной обработки стали. Сообщение 2. // Г. А. Мельник, О. С. Забарилло, А. А. Ждановский и др. // Там же. — №3. — С. 86–92.
4. *Трёхфазные* плазменные нагревательные комплексы и перспективы их применения. Сообщение 1. // Б. Е. Патон, Ю. В. Латаш, О. С. Забарилло и др. // Там же. — 1985. — № 1. — С. 50–55.
5. *Трёхфазные* плазменные нагревательные комплексы и перспективы их применения. Сообщение 2. // Б. Е. Патон, Ю. В. Латаш, О. С. Забарилло и др. // Там же. — № 2. — С. 53–57.
6. *Смоляренко В. Д., Кузнецов Л. Н.* Энергетический баланс дуговых сталеплавильных печей. — М.: Энергия, 1973. — 88 с.
7. *Никольский Л. Е., Смоляренко В. Д., Кузнецов Л. Н.* Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. — М.: Металлургия, 1981. — 320 с.
8. *Сосонкин О. М., Кудрин В. А.* Водоохлаждаемый свод электродуговой печи. — М.: Металлургия, 1985. — 144 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 08.04.2004