

## Энергосбережение при производстве стали в плазменно-дуговых печах\*

Макаров А. Н., доктор техн. наук, Рыбакова В. В., Галичева М. К., инженеры  
Тверской государственной технической университет

Аналитическим путем определено рациональное положение стеновых плазмотронов и дуг в плазменно-дуговых сталеплавильных печах с двумя и четырьмя плазмотронами. При рациональном положении плазмотронов расход электроэнергии снижается на 16–18 %, продолжительность плавки — на 19–20 %.

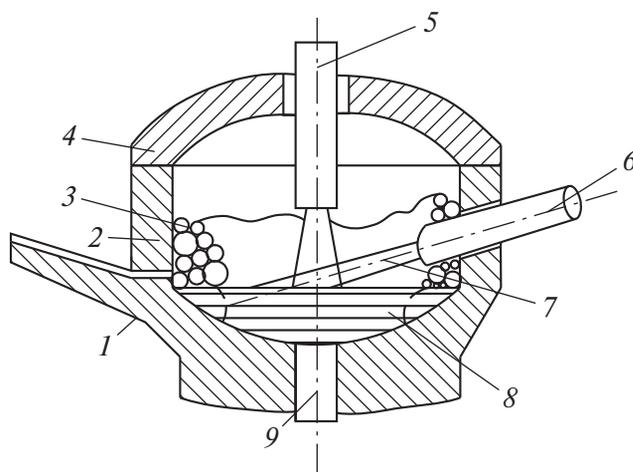
**Ключевые слова:** энергосбережение, плазменно-дуговая печь, угловой коэффициент излучения, электросталь.

Плазменно-дуговые сталеплавильные печи постоянного тока (ПДСП) используются для производства высоколегированных сталей. Печи вместимостью до 10 т включительно снабжаются одним вертикально установленным плазмотроном, вместимостью 12–30 т — двумя–четырьмя плазмотронами, расположенными в стенах печей наклонно.

Одна из перспективных конструкций — ПДСП вместимостью до 10 т с двумя плазмотронами, один из которых установлен в своде печи вертикально, второй — в стене наклонно (рис. 1) [1]. При разработке данной конструкции были решены задачи повышения КПД печи, уменьшения времени плавки и увеличения производительности.

Длина дуги в разработанной конструкции составляет от 0,3 до 2 м и зависит от градиента напряжения в ее столбе, который в

свою очередь зависит от состава плазмообразующего газа и температуры печной среды. Градиент напряжения в столбе дуги в про-



**Рис. 1.** Схема плазменно-дуговой сталеплавильной печи постоянного тока с двумя плазмотронами:

1 — кожух; 2 — футеровка; 3 — шихта; 4 — свод; 5 и 6 — сводовый и стеновой плазмотроны; 7 — дуга; 8 — ванна металла; 9 — подовый электрод

\* Работа выполнена по Соглашению № 14.В37.21.1067 между Минобрнауки РФ и ТвГТУ на проведение фундаментальных исследований в области металлургии.

цессе плавки уменьшается в 1,5 – 2 раза при повышении температуры печной среды. При использовании аргона в качестве плазмообразующего газа и температуре печной среды  $T_{\text{п}} = 1700$  К градиент напряжения в столбе дуги равен 0,3 – 0,5 В/мм, при  $T_{\text{п}} = 2000$  К — 0,1 – 0,2 В/мм.

По данным [2], для аргоновой дуги длиной 0,8 м с током 9 кА доли излучения, конвекции, теплопроводности в общей ее мощности  $P_{\text{д}}$  имеют следующие значения:  $P_{\text{л}} = 82$  %,  $P_{\text{к}} = 16$  %,  $P_{\text{т}} = 2$  %. В дугах ПДСП с длиной 0,3 – 2 м и током 6 – 10 кА осуществляется преобразование электрической энергии в тепловую, преимущественно в энергию излучения, доля которой составляет 80 – 95 % в общем балансе мощности. Аналогичные данные приведены в [3], где описаны исследования теплообмена на действующих ПДСП. Методом двух тепломеров разделяли конвективную и лучистую составляющие тепловых потоков, падающих на поверхности нагрева. Результаты измерений показали, что на долю потока излучения, падающего на поверхности стен и сводов, приходится 86 – 96 % суммарного теплового потока. Таким образом, основной вид теплообмена в ПДСП — теплообмен излучением. Мощность  $P_{\text{т}}$  приблизительно в равных количествах (по 1 %  $P_{\text{д}}$ ) отводится от дуги теплопроводностью к катоду, которым является плазмотрон, и аноду — подовому электроду.

Работа ПДСП с низким КПД дуг приводит к повышенному удельному расходу электроэнергии, который в печах вместимостью 3 – 6 т с одним вертикально расположенным плазмотроном составляет 850 – 950 кВт · ч/т шихты. В печах вместимостью 12 – 30 т с двумя — четырьмя плазмотронами, установленными в стенах печей, КПД дуг выше, и удельный расход электроэнергии на расплавление шихты равен 600 – 650 кВт · ч/т. Плазмотроны устанавливаются в стенах печей под углом 30 – 50° к вертикальной оси.

При разработке новой конструкции печи с двумя плазмотронами было проведено аналитическое исследование по определению рационального угла наклона стенового плазмотрона, для чего рассчитали значения углового коэффициента излучения (УКИ)  $\phi_{\text{л.в}}$  при разных углах наклона. Средний УКИ показывает долю излучения столба дуги на ванну металла. Его можно определить методом светового моделирования теплообмена излучением в дуговых сталеплавильных печах [3]. Однако световое моделирование дает погрешность 20 – 25 %, требует создания моделей дуговых

сталеплавильных печей (ДСП), приборной оснастки, обладает значительной трудоемкостью. Взамен светового моделирования разработан аналитический метод определения УКИ дуг на ванну металла в ДСП [4, 5]. Аналитический метод имеет более высокую точность и менее трудоемок при использовании программных средств. Он может применяться при проектировании новых печей и выборе рациональных режимов действующих печей.

Для определения необходимых расстояний и углов воспользовались программным средством “Компас 3D” в операционной системе MS Windows. Для автоматизации расчета локальных и средних УКИ дуги на ванну металла применяли программу Microsoft Excel. Чтобы результаты аналитического исследования УКИ дуг в ПДСП при разных длинах дуг и углах наклона плазмотрона к вертикальной оси можно было использовать при конструировании новых ПДСП и выборе рациональных энергетических режимов действующих печей различной вместимости, провели расчеты при соотношениях длины дуги  $l_{\text{д}}$  и диаметра ванны металла  $D_{\text{в}}$  и разных углах наклона плазмотрона к ванне металла.

Аналитическими исследованиями доказано, что после расплавления части шихты, когда свод и 1/2 стен освободятся от шихты, плавку необходимо вести стеновым плазмотроном, создающим дугу, наклоненную к вертикальной оси под углом 75°, длина которой равна  $(0,4 \div 0,5)D_{\text{в}}$  на уровне откосов при смещении анодного пятна на расстояние  $(0,25 \div 0,329)D_{\text{в}}$  от центра симметрии поверхности ванны. При таком положении плазмотрона и дуги доля ее излучения на ванну металла возрастает с 21,6 до 39,6 %, т. е. на 80 %. Поскольку излучение от длинной дуги ПДСП составляет не менее 82 % ее мощности, КПД дуги увеличивается с 27,7 до 42,5 %, т. е. на 53 % по сравнению с вертикальным положением плазмотрона. Расчеты, проведенные для энергетического режима 6-тонной ПДСП, показывают, что при использовании в начале плавки вертикального плазмотрона и последующем переходе в середине расплавления, а также в жидкие периоды плавки стали на работу стенового плазмотрона с рассчитанным рациональным его положением снижаются расход электроэнергии за плавку на 12 – 14 % и продолжительность плавки — на 15 – 16 %.

С помощью данного метода были выполнены аналитические исследования по определению рационального положения плазмотронов в 30-тонной ПДСП. По их результатам

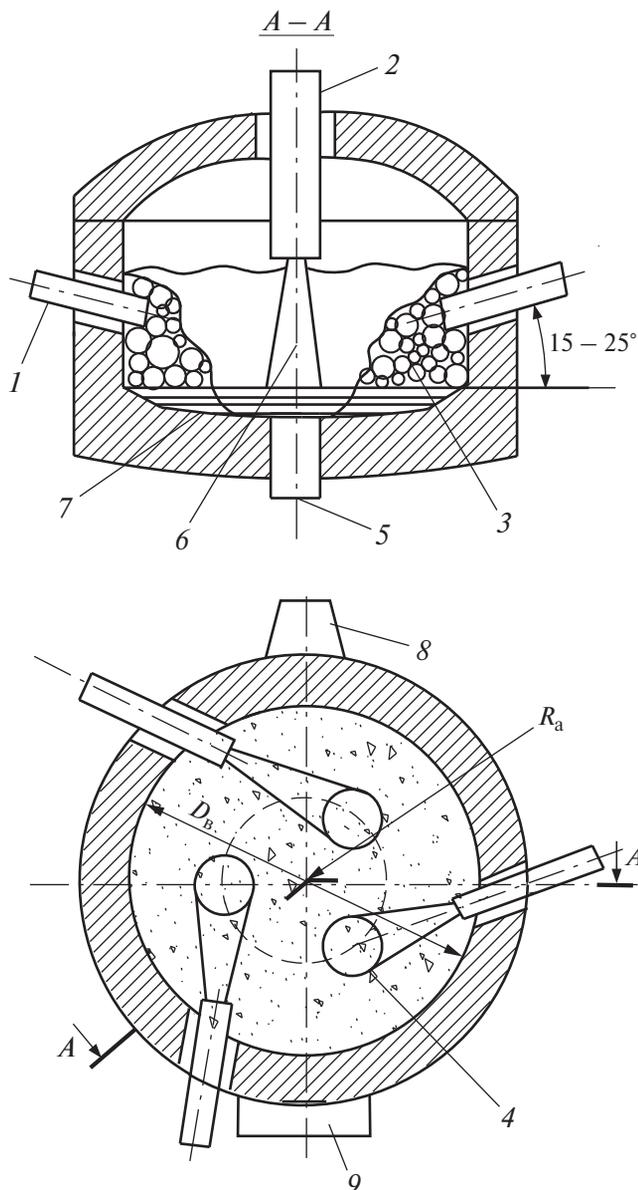


Рис. 2. Схема плазменно-дуговой сталеплавильной печи с четырьмя плазмотронами:

1 — три стеновых плазмотрона; 2 — сводовый плазмотрон; 3 — шихта; 4 — анодные пятна; 5 — подовый электрод; 6 — дуга; 7 — ванна металла; 8 — сливной носок; 9 — рабочее окно

предложена ПДСП с четырьмя плазмотронами [6] (рис. 2). Параметры: ток дуги  $I_d = 10$  кА, выпрямленное напряжение  $U_B = 825$  В, напряжение на дуге  $U_d = 160 \div 600$  В, мощность дуги  $P_d = 1600 \div 6000$  кВт, расчетная длина дуги  $l_d$  при градиенте напряжения в ее столбе  $0,27$  В/мм составляет  $(160 \div 600) / 0,27 = 590 \div 2200$  мм.

Плавнение шихты в ПДСП начинают вертикальным плазмотроном. В процессе ее расплавления и опускания в ванну КПД дуги уменьшается. Работа печи с низким КПД дуги ведет к значительному удельному расхо-

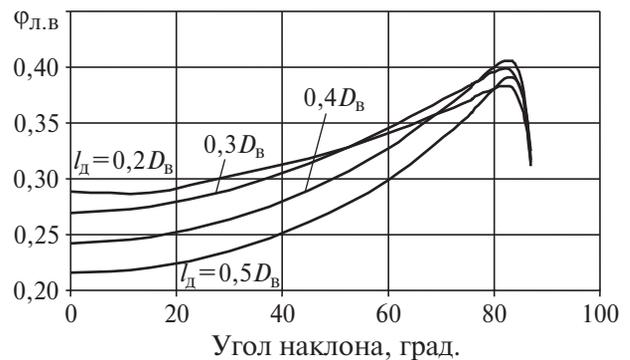


Рис. 3. Зависимости среднего углового коэффициента излучения дуги на ванну металла от угла наклона плазмотрона при разных длинах дуги

ду электроэнергии, при этом ее потери достигают  $60 - 72$  %. После расплавления от 1/3 до 1/2 шихты сводовый плазмотрон отключают, включают три стеновых плазмотрона, которыми осуществляют доплавнение шихты и проведение жидких периодов плавки.

Было определено рациональное положение трех плазмотронов, их дуг и анодных пятен на ванне металла. Результаты расчета средних УКИ дуги на ванну металла представлены на рис. 3. Как видно, при вертикальном горении дуги с уменьшением ее длины средний УКИ на ванну металла увеличивается: при  $l_d = 0,5 D_B$   $\phi_{Л.В} = 0,216$ , при  $l_d = 0,2 D_B$   $\phi_{Л.В} = 0,288$ , т. е. с уменьшением длины дуги в 2,5 раза средний УКИ дуги и доля ее излучения на ванну металла повысились на 33 %. Максимального значения средний УКИ дуги на ванну металла  $\phi_{Л.В} = 0,406$  достигает при  $l_d = 0,4 D_B$  и угле наклона плазмотрона к вертикальной оси  $83^\circ$ . Однако при таком угле наклона плазмотрон приближается к ванне металла, и в нем возрастают тепловые потери на охлаждение. Очевидно, что рациональным углом наклона плазмотрона, при котором тепловые потери на его охлаждение увеличатся незначительно по сравнению с вертикальным положением, будет угол  $70 - 75^\circ$ . При угле  $75^\circ$  максимального значения  $\phi_{Л.В} = 0,383$  средний УКИ достигает при  $l_d = 0,3 D_B$ . При этом на ванну металла приходится 38,3 % мощности, излучаемой дугой, остальные 61,7 % — на стены и свод печи. При вертикальном горении дуги длиной  $l_d = 0,3 D_B$   $\phi_{Л.В} = 0,270$ , т. е. при наклоне плазмотрона на угол  $75^\circ$  к вертикальной оси доля излучения дуги на ванну металла повышается на 42 %.

Были рассчитаны средние УКИ дуги на ванну металла при различных смещениях анодного пятна по оси симметрии ванны.

Для расчета приняли восемь положений плазматрона и анодного пятна: положение VII — анодное пятно находится в центре симметрии поверхности ванны, для положений VI — I расстояния, на которые смещено анодное пятно от центра поверхности ванны металла, равны соответственно  $0,136, 0,249, 0,321, 0,381, 0,432, 0,477D_B$ . Положение плазматрона VIII симметрично положению VI, и анодное пятно находится на расстоянии  $0,136D_B$ . На рис. 4 приведены результаты расчета средних УКИ дуги на поверхность ванны металла в зависимости от смещения анодного пятна, угла наклона плазматрона и длины дуги.

Для угла наклона плазматрона  $75^\circ$  при  $l_d = 0,5D_B$  и смещении анодного пятна в положение IV и при  $l_d = 0,4D_B$  и положении V анодного пятна максимальные средние УКИ равны  $0,396$ . Следовательно, долю излучения дуги на ванну металла можно увеличить еще на 3% по сравнению с ранее найденным максимальным значением  $\varphi_{л.в} = 0,383$  среднего УКИ при  $l_d = 0,3D_B$ , угле наклона плазматрона  $75^\circ$  и расположении анодного пятна в центре ванны металла. При  $l_d = 0,5D_B$  и вертикальном горении дуги  $\varphi_{л.в} = 0,216$ .

Плазматроны располагают в стене под углом  $15 - 25^\circ$  к ванне металла (см. рис. 2), что обеспечивает аналогичное расположение дуг к ванне металла, при этом отношение длины дуги к диаметру плавильного пространства на уровне откосов ванны  $l_d/D_B = 0,5 \div 0,6$ . Оптимальное соотношение радиуса окружности, на котором расположены три анодных пятна  $4$ , к диаметру плавильного пространства на уровне откосов ванны  $R_a/D_B = 0,23 \div 0,26$ . Переход на плавление шихты стеновыми плазматронами позволяет увеличить УКИ каждой из трех дуг на ванну с  $\varphi_{л.в} = 0,22$  до  $\varphi_{л.в} = 0,39$ , а КПД дуг — с  $\eta_d = 0,28$  до

$$\eta_d = \frac{0,1P_d + 0,82P_d\varphi_{л.в}}{P_d} = 0,1 + 0,82 \cdot 0,39 = 0,42. \quad (1)$$

Таким образом, при работе на жидкометаллическую ванну КПД дуги плазматрона, установленного рационально в стене ПДСП, на 50% больше КПД дуги аналогичной длины и мощности сводового плазматрона, поэтому большую часть расплавления шихты и жидкого периода плавки стали проводят стеновыми плазматронами. Осуществить расплавление шихты с начала до окончания

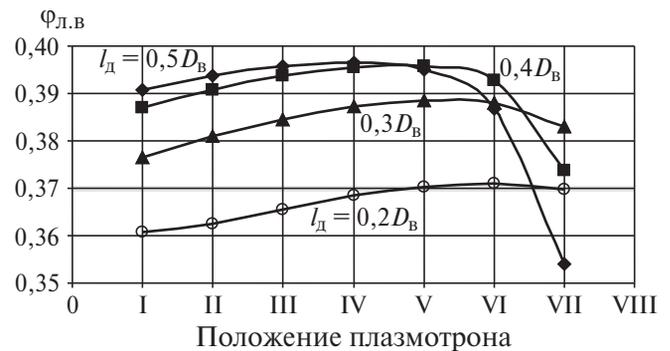


Рис. 4. Зависимости среднего углового коэффициента излучения дуги от положения плазматрона при его наклоне  $75^\circ$  и разных длинах дуги

плазматронами, размещенными в стене под углом  $15 - 25^\circ$  к ванне металла, невозможно вследствие постоянных обвалов шихты, неустойчивости горения дуги и электрического режима. Кроме того, увеличиваются период расплавления и продолжительность плавки. Включать стеновые плазматроны можно после прорезки в шихте сводовым плазматроном колодца в виде перевернутого усеченного конуса (см. рис. 2). Расчеты, выполненные для энергетического режима 30-тонной ПДСП, показывают, что при использовании в начале плавки сводового плазматрона и переходе в середине периода расплавления и в жидкие периоды плавки стали на работу с тремя стеновыми плазматронами с рассчитанным их рациональным положением расход электроэнергии за плавку уменьшается на  $16 - 18\%$ , а продолжительность плавки — на  $19 - 20\%$ .

### Список литературы

1. Пат. 2330072 RU, 2330072 С1. Способ плавки стали в плазменно-дуговой печи постоянного тока / А. Н. Макаров, Р. М. Зуйков. — Изобретения. Полезные модели, 2008, № 21.
2. Бортничук Н. И., Крутянский М. М. Плазменно-дуговые плавильные печи. — М.: Энергоиздат, 1981.
3. Никольский Л. Е., Смоляренко В. Д., Кузнецов Л. Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. — М.: Металлургия, 1981.
4. Макаров А. Н., Макаров Р. А. Распределение потоков излучения дуг в дуговых сталеплавильных печах трехфазного и постоянного токов в период расплавления. — Изв. вузов. Черная металлургия, 1998, № 2.
5. Макаров А. Н., Шимко М. Б., Зуйков Р. М. Теплообмен в одно- и четырехэлектродных дуговых сталеплавильных печах постоянного и переменного тока. — Электрометаллургия, 2006, № 8.
6. Пат. 2415359 RU, 2415359 С1. Плазменно-дуговая сталеплавильная печь постоянного тока / А. Н. Макаров, Ю. А. Луговой, М. Н. Шевченко. — Изобретения. Полезные модели, 2011, № 9.