

- Особенности нагрева металла – до 900 °С открытый ускоренный нагрев в безокислительной атмосфере или горячий посад металла.
- Предупреждение диффузионной сварки заготовок при отжиге – ограничение времени их неподвижного контакта.
- Сохранность атмосферы – печи оснащаются продуваемыми защитным газом загрузочными шлюзами и подовыми тамбурами.

Выводы. Проведенный анализ и промышленный нагрев блюмов подтверждают высокую технологическую и энергетическую эффективность необезуглероживающего нагрева с применением муфелирования металла и импульсным подводом в муфель чистого или в смеси с азотом природного газа. При этом технологический расход природного газа, даже при длительном диффузионном отжиге стали, не превышает 1 % его общего расхода в печи на 1 т нагретого металла.

УДК 669.018.8

А.С. Ткачев, А.А. Кожухов, Э.Э. Меркер

Старооскольский технологический институт

ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЭЛЕКТРОДОВ НА СОВРЕМЕННЫХ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ

Анализ научно-технической литературы [1, 2] показывает, что идея применения полых (трубчатых) электродов возникла давно, однако вопрос их практического использования вместо обычных сплошных электродов в современных дуговых сталеплавильных печах (ДСП) находится еще в стадии исследования и полупромышленных испытаний. В большинстве работ перспектива применения полых (трубчатых) электродов на ДСП различной вместительности связывают, в первую очередь, со стабилизацией горения электрической дуги.

Однако в опубликованных работах отсутствуют данные об эффективности применения полых (трубчатых) электродов с точки зрения улучшения тепловой работы ДСП. Одним из параметров, характеризующих тепловую работу современной ДСП, является коэффициент использования тепла (КИТ) электрических дуг. Поэтому представляется актуальным выполнить сравнительную оценку КИТ электрических дуг при работе ДСП на сплошных и полых (трубчатых) электродах.

Известно, что основным источником энергии в ДСП является электрическая дуга, на долю которой приходится около 60 % энергии, поступающей в современную высокомошную ДСП. Величина КИТ элек-

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теснер П.А. Образование углерода из углеводородов газовой фазы. – М.: Химия, 1972. – 136 с.
2. Введенский В.В. Термодинамические расчеты нефтехимических процессов. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – 576 с.
3. Продукты сгорания природного газа при высоких температурах (состав и термодинамические свойства) /И.Н. Карп, Б.С. Сорока, Л.Н. Дашевский, С.Д. Семернина. – Киев.: Техника, 1967. – 381 с.
4. Эстрин Б.М., Шумянский Ю.И. Контролируемые атмосферы в производстве металлопродукции. – М.: Metallurgia, 1991. – 302 с.
5. Окисление и обезуглероживание стали / А.И. Ващенко, А.Г. Зеньковский, А.Е. Лифшиц и др. – М.: Metallurgia, 1972. – 336 с.
6. Леонидова М.Н., Шварцман Л.А., Шульц Л.А. Физико-химические основы взаимодействия металлов с контролируемыми атмосферами. – М.: Metallurgia, 1980. – 263 с.
7. Курносое В.В., Шульц Л.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 5. С. 65 – 69.

© 2012 г. В.В. Курносое, Л.А. Шульц
Поступила 10 октября 2012 г.

трических дуг определяет величину удельного расхода электроэнергии [3], т.е. чем больше величина КИТ электрических дуг, тем меньше удельный расход электроэнергии.

Согласно данным работы [4], КИТ электрических дуг ($\eta_{\text{КИТ}}^{\text{эл.д}}$) можно определить по следующему выражению:

$$\eta_{\text{КИТ}}^{\text{эл.д}} = \frac{0,8P_{\text{а-к}} + 0,05P_{\text{д}} + \varphi_{\text{д-м}}(P_{\text{д}} - P_{\text{а-к}} - 0,05P_{\text{д}})}{P_{\text{д}}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{д}}$ – мощность электрической дуги, идущая на нагрев и расплавление металла; $P_{\text{а-к}}$ – мощность, которая выделяется в анодном и катодном пятне; $\varphi_{\text{д-м}}$ – средний угловой коэффициент излучения дуги на металл, который показывает долю мощности, излучаемую столбом дуги на металлическую ванну.

Расчет мощности электрической дуги, а также мощности, выделяющейся в анодном и катодном пятнах, представлен в работах [5, 6]. Методика расчета средних угловых коэффициентов излучения дуг ($\varphi_{\text{д-м}}$) изложена в работах Макарова А.Н. [3 – 5]. Рассмотрим расчет величины среднего углового коэффициента излучения

столба дуги на поверхность металла как суммы локальных угловых коэффициентов излучения дуги на эту поверхность.

Известно, что в ДСП трехфазного тока, работающих на сплошных электродах, под воздействием электромагнитных сил происходит выдувание электрической дуги из-под торца электрода, при этом угол отклонения дуги от оси электрода φ может достигать 45° [5]. В то же время, при работе на полых (трубчатых) электродах, согласно данным [1, 2, 7], величина отклонения электрической дуги от оси электрода не превышает 20° , что объясняется центрирующим действием отверстия на электрическую дугу. Поэтому при расчете величины локального углового коэффициента излучения на поверхность металла необходимо рассмотреть излучение столба электрической дуги с ее внутренней и внешней стороны. Кроме того, при работе на полем (трубчатом) электроде за счет более вертикального горения электрической дуги увеличивается степень ее заглуждения в металлическую ванну, что сокращает длину ее открытой части.

Пусть требуется определить локальный угловой коэффициент излучения электрической дуги длиной l_d , расположенной под углом $(90 - \varphi)^\circ$ к горизонтальной плоскости на поверхность элементарной площадки, находящейся на горизонтальной плоскости (поверхности металла) от линейного источника – электрической дуги (рис. 1). Точка A расположена на геометрическом центре площадки K , через эту точку проходит нормаль N_2 к поверхности площадки; r – кратчайшее расстояние от дуги до точки A , β – угол, под которым видна дуга из точки A на поверхности площадки.

Выделим на источнике бесконечно малый элемент dl_d , т.е. цилиндр бесконечно малого диаметра и бесконечно малой высоты. Известно, что элементарный угловой коэффициент излучения с поверхности элементарного цилиндра на поверхность элементарной площадки определяется следующим образом:

$$d\varphi_k = \frac{\cos \alpha_i \cos \beta_i F_h dl_d}{\pi^2 l_i^2 l_d}, \quad (2)$$

где α – угол между нормалью N к оси элементарного цилиндра и направлением излучения, град; β_i – угол между нормалью N_2 к центру элементарной площадки и направлением излучения, град; F_h – площадь поверхности элементарной площадки, m^2 ; l_i – расстояние от элементарного цилиндра до элементарной площадки, м.

Локальный угловой коэффициент излучения линейного источника на поверхность элементарной площадки определяется интегрированием выражения (2) в пределах изменения угла α . Из рис. 1 видно, что $l_i = r \sin(\pi/2 - \varphi) / \sin(\pi/2 - \alpha_i)$. Подставив это значение в выражение (2) и проинтегрировав его пределах от φ до $(\varphi + \beta)$, получим аналитическое выражение для расчета локального углового коэффициента излучения

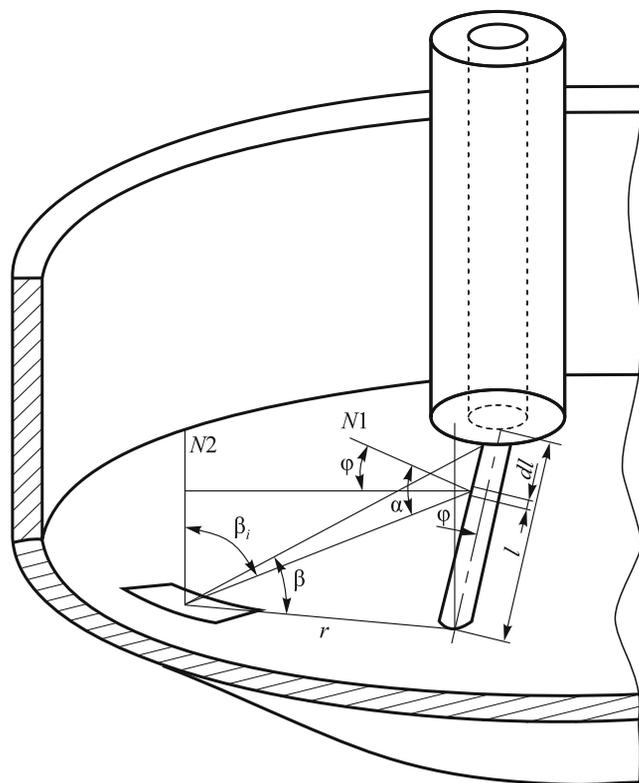


Рис. 1. Геометрические построения для определения локальных угловых коэффициентов излучения линейного источника на элементарную площадку, расположенную на плоскости, при взаимном пересечении линейного источника и плоскости (элементарная площадка находится с внешней стороны линейного источника)

дуги на элементарную площадку K , расположенную на поверхности ванны металла с внешней стороны от источника излучения:

$$\varphi_k = \int_{\varphi}^{\varphi+\beta} \frac{F_k \sin(\alpha_i - \varphi) \sin(\pi/2 - \alpha_i) d\alpha}{\pi^2 r l_d \sin(\pi/2 + \varphi)} = \frac{F_k}{2\pi^2 r l_d \sin(\pi/2 + \varphi)} \left\{ \cos \varphi [\sin^2(\varphi + \beta) - \sin^2 \varphi] - \sin \varphi [\beta + \cos(2\varphi + \beta) \sin \beta] \right\}. \quad (3)$$

Далее необходимо определить локальные угловые коэффициенты излучения линейного источника на элементарную площадку при их расположении в пересекающихся плоскостях и при расположении элементарной площадки с внутренней стороны от линейного источника (рис. 2). Локальный угловой коэффициент излучения линейного источника на элементарную площадку, расположенную с внутренней стороны линейного источника, определяется интегрированием выражения (2) в пределах изменения α_1 и α_2 .

Из рис. 2 видно, что $\cos \beta_{i1} = \sin(\varphi - \alpha_{i1})$; $\cos \beta_{i2} = \sin(\varphi - \alpha_{i2})$; $l_i = r \sin(\pi/2 - \varphi) / \sin(\pi/2 - \alpha_{i1})$; $l_i = r \sin(\pi/2 - \varphi) / \sin(\pi/2 - \alpha_{i2})$; $dl_{d1} \cos \alpha_{i1} = l_{i1} d\alpha_{i1}$; $dl_{d2} \cos \alpha_{i2} = l_{i2} d\alpha_{i2}$. Подставим эти значения в уравнение (2) и, проинтегрировав его в пределах изменения α_{i1} от 0 до φ и

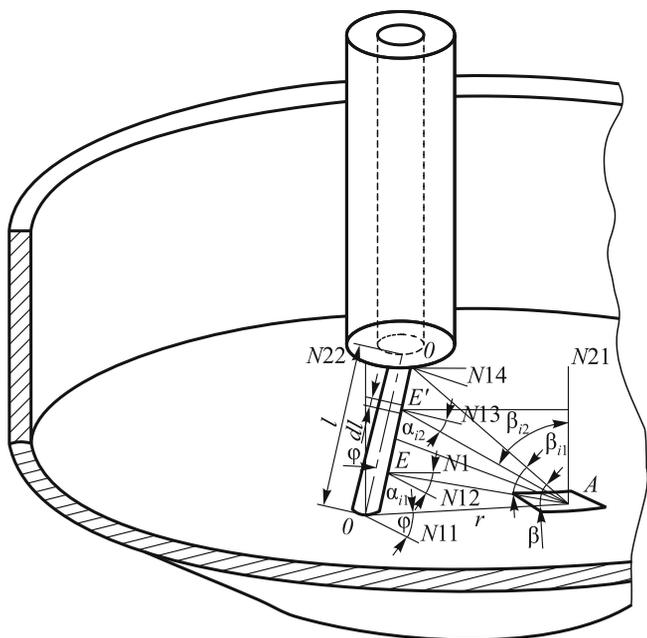


Рис. 2. Геометрические построения для определения локальных угловых коэффициентов излучения линейного источника на элементарную площадку, расположенную на плоскости, при взаимном пересечении линейного источника и плоскости (элементарная площадка находится с внутренней стороны линейного источника)

α_{i2} от 0 до $(\beta - \varphi)$, получим следующее аналитическое выражение:

$$\begin{aligned} \varphi_k &= \int_0^\varphi \frac{F_k \sin(\varphi - \alpha_{i1}) \sin(\pi/2 + \alpha_{i1}) d\alpha_{i1}}{\pi^2 r l_d \sin(\pi/2 - \varphi)} + \\ &+ \int_0^{\beta - \varphi} \frac{F_k \sin(\varphi - \alpha_{i2}) \sin(\pi/2 + \alpha_{i2}) d\alpha_{i2}}{\pi^2 r l_d \sin(\pi/2 - \varphi)} = \\ &= \frac{F_k}{2\pi^2 r l_d} \left\{ [\sin^2(\beta - \varphi) - \sin^2 \varphi] + \right. \\ &\left. + \operatorname{tg} \varphi [\beta + \sin \beta \cos(\beta - 2\varphi)] \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Вся площадь поверхности металла состоит из n поверхностей элементарных площадок, поэтому средний угловой коэффициент излучения дуги на поверхность металлической ванны $\varphi_{д-м}$ определяется как сумма локальных угловых коэффициентов излучения дуги на элементарные площадки:

$$\varphi_{д-м} = \sum_1^n \varphi_{д-к}. \quad (5)$$

С использованием полученных выражений рассчитаем средние угловые коэффициенты излучения электрических дуг на поверхность металла ДСП вместимостью 150 т при ее работе на сплошном и полом электродах.

Для расчета локальных угловых коэффициентов излучения электрических дуг на элементарную площадку на поверхности металлической ванны разобьем эту поверхность на 40 колец шириной 0,82 м и 36 радиальными прямыми, смещенными одна относительно другой на равные углы, при этом каждое кольцо разобьется на 36 кольцевых, а круг – на 36 круговых секторов. Пусть каждый сектор представляет собой элементарную площадку К на поверхности ванны металла (см. рис. 1, 2), расчетная точка А располагается в центре элементарной площадки. Далее необходимо произвести геометрические построения, изображенные на рис. 1 и 2, и по выражениям (3) и (4) выполнить расчет локальных угловых коэффициентов излучения дуги на каждый из секторов, а по выражению (5) определить величину среднего углового коэффициента на поверхность ванны металла. Затем, используя формулу (1), осуществляем расчет КИТ электрических дуг ДСП, работающей на сплошном и полом (трубчатом) электроде в период жидкой ванны. Результаты расчета средних угловых коэффициентов и величины КИТ электрических дуг приведены в таблице.

Анализ полученных данных показывает, что величина КИТ электрических дуг в период жидкой ванны для

Сравнительные данные тепловой работы ДСП на сплошных и полых (трубчатых) электродах

Параметр	Электрод	
	Сплошной	Полый
Вместимость печи, т	150	150
Мощность полная, МВА	90	90
Ток дуги, кА	61	61
Мощность дуги, МВт	25	25
Сумма анодного и катодного падения напряжения, В	18	18
Градиент напряжения столба дуги, В/мм	0,8	0,8
Диаметр электрода, мм	600	600
Диаметр отверстия, мм	–	90
Длина открытой части дуги, мм	450	340
Угол отклонения дуги от оси электрода, град	45	18
Средний угловой коэффициент излучения дуги на металл	0,55	0,62
Коэффициент использования тепла электрической дуги	0,58	0,64

дуговой печи, работающей на полом (трубчатом) электроде, составляет $\eta_d = 0,64$, что на 13 % выше, чем при работе на сплошном электроде ($\eta_d = 0,58$). Это объясняется тем, что за счет более сильного заглубления дуги в металл и эффективного экранирования электрической дуги сверху электродом уменьшается интенсивность облучения футеровки стены, что позволяет организовать более направленный тепловой поток от электрической дуги на ванну металла и тем самым интенсифицировать тепловую работу ДСП. Это подтверждается расчетами величины среднего углового коэффициент излучения электрической дуги на металл в период жидкой ванны. Так для печи, работающей на полом (трубчатом) электроде $\varphi_{д-м} = 0,62$, а при работе на сплошном $\varphi_{д-м} = 0,55$. Необходимо отметить, что КИТ электрических дуг в ДСП, работающей на полых (трубчатых) электродах, в сравнении с работой на сплошных электродах будет больше на 13 % на протяжении всего времени плавки, так как после формирования колодцев, которое для сверхмощных ДСП в среднем длится 5–7 мин, дуги заглубляются в жидкометаллическую ванну. Все это говорит о том, что применение на ДСП полых (трубчатых) электродов позволяет увеличить на 13 % вводимую в ванну мощность и сократить удельный расход электроэнергии. Таким образом, применение полых (трубчатых) электродов в ДСП является экономически целесообразным, так как позволяет повысить технико-экономические показатели ее работы.

Выводы. Аналитическими исследованиями установлено, что при равных условиях проведения плавки

стали для ДСП одинаковой мощности и вместимости наибольший коэффициент использования тепла электрических дуг наблюдается на печах, работающих на полом (трубчатом) электроде за счет большего среднего углового коэффициента излучения электрических дуг на поверхность металла и организации более направленного теплового потока. Кроме того, за счет увеличения на 13 % вводимой мощности уменьшается длительность электроплавки и сокращается удельный расход электроэнергии, что свидетельствует об эффективности и перспективности применения полых электродов в ДСП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Егоров А.Е., Никольский Л.Е., Огороков Н.В. // Электротермия. 1962. № 9. С. 27–31.
2. Огороков Н.В., Никольский Л.Е., Егоров А.В. // Электротермия, 1962. № 9. С. 13–18.
3. Макаров А.Н., Макаров Р.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1998. № 2. С. 11–14.
4. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных печах и топках паровых котлов. – Тверь: ТГТУ, 2003. – 348 с.
5. Макаров А.Н., Макаров Р.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1999. № 6. С. 16–19.
6. Промышленные установки электродугового нагрева и их параметры. / Под. общ. ред. Л.Е. Никольского. – М.: Энергия, 1971. – 272 с.
7. Сазонов А.В., Кожухов А.А., Меркер Э.Э. // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2007. № 11. С. 40–42.

© 2012 г. А.С. Ткачев, А.А. Кожухов, Э.Э. Меркер
Поступила 23 июля 2012 г.

УДК 669.412: 621.047

В.А. Ульянов, В.Н. Гуцин, С.А. Балан

Нижегородский государственный технический университет

ВЛИЯНИЕ ЕМКОСТИ МОДЕРНИЗИРОВАННЫХ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШЕЙ НА ОЧИЩЕНИЕ РАСПЛАВА ОТ ПРИМЕСНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Конструкция и форма промежуточного ковша должны выполняться таким образом, чтобы уменьшить попадание в кристаллизатор неметаллических включений, иметь возможность быстро заменить ковш при неполадках, обеспечить удобное наблюдение за мениском металла в кристаллизаторе и осуществить выполнение различных технологических операций, например подачу защитных смесей на мениск, замену разливочных стаканов, контроль и поддержание уровня металла в кристаллизаторе [1, 2]. Конфигурация некоторых промежуточных ковшей, применяемых при разливке слабовых МНЛЗ, приведена на рис. 1.

Для уменьшения попадания в кристаллизатор неметаллических включений (НВ) и частиц шлака применяются ковши сложной конфигурации. Это обеспечивается за счет увеличения расстояния от места подвода металла до разливочного отверстия. С этой же целью в промежуточных ковшах устанавливают огнеупорные перегородки [3–5].

Промежуточный ковш современных МНЛЗ снабжен приспособлениями, позволяющими устранить влияние таких источников загрязнения, как вторичное окисление, эрозия огнеупоров, взаимодействие с ковшевым шлаком, обеспечить всплывание и отделение НВ за счет правильной организации движения металла,