

двукальциевый силикат $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$, с которым и связано аномальное падение прочности готовой продукции. С дальнейшим ростом основности аглошихты увеличивается парциальное давление кислорода в газовой фазе в результате роста CO_2 из-за разложения известняка при практически постоянном содержании CO , определяемом расходом углерода в шихте. В этом случае в расплаве вместо двухвалентного железа устойчивым становится железо трехвалентное. Поэтому процесс кристаллизации железосиликатного расплава рассмотрен в областях диаграммы состояния $\text{CaO-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ с трехвалентным железом (рис. 6, б). В железном угле этой диаграммы состояния из железосиликатного расплава в области эвтектики (температура 1216°C) на границе полей кристаллизации двукальциевого силиката и полукальциевого феррита появляется ассоциация двух минералов: Ca_2SiO_4 и CaFe_4O_7 , обнаруженная в реальном составе агломератов в узком интервале основности 1,8 – 2,0.

Пути кристаллизации железосиликатных расплавов при высокой основности шихты проходят через поля существования на диаграмме состояния $\text{CaO-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ однокальциевого CaFe_2O_3 и двукальциевого $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ ферритов, однако состав ферритных фаз в реальных связках агломератов и местоположения их на диаграмме состояния трудно согласуются, поскольку именно эти области диаграммы состояния наименее изучены (см. рис. 6).

Выводы. Основным носителем прочности офлюсованных агломератов является минеральный состав связок рудных зерен. При этом существует четкая зависимость: минералогический состав связок определяется основностью шихты, а прочность готовой продукции, в свою очередь, напрямую зависит от состава связки рудных зерен.

На примере агломератов ММК при повышении основности шихты от 1,0 до 3,0 происходит постепенная смена силикатных и ферритных связок.

Самую низкую прочность имеют агломераты основности 1,6, силикатные связки которых лежат на границе

полей кристаллизации оливина и двукальциевого силиката β -модификации. При охлаждении агломерата ниже 675°C в результате модификационного превращения Ca_2SiO_4 из β в γ агломераты разрушаются.

С ростом основности выше 1,6 в агломератах происходит изменение направления минералообразования связок. Расплавообразующим компонентом становится трехвалентное железо. В связках агломератов появляются ферритные фазы. Образование ферритных связок вместо силикатных является главной причиной роста прочности агломерата.

Причиной изменения направления минералообразования связок рудных зерен агломератов является рост парциального давления кислорода в газовой фазе. В процессе спекания высокоофлюсованных шихт при разложении известняка в составе газовой фазы увеличивается количество CO_2 и меняется соотношение CO_2/CO в зоне спекания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Металлургия чугуна. /Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев, Ю.С. Юсфин и др. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 775 с.
2. Коротич В.И., Фролов Ю.А., Бездежский Г.Н. Агломерация рудных материалов. – Екатеринбург. 2003. – 400 с.
3. Коротич В.И. Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке. – М.: Металлургия, 1978. – 210 с.
4. Утков В.А. Высокоосновный агломерат. – М.: Металлургия, 1977. – 156 с.
5. Малышева Т.Я. Железорудное сырье: упрочнение при термобработке. – М.: Наука, 1988. – 425 с.
6. Базилевич С.В., Вегман Е.Ф. Агломерация. – М.: Металлургия, 1967. – 368 с.
7. Юсфин Ю.С., Мансурова Н.Р. и др. // Сталь. 2007. № 2. С. 18 – 21.
8. Affen W.C., Snow R.B. // Am. Ceram. Soc. 1955. Vol. 38. P. 264 – 280.
9. Phillips B., Muan A. // Am. Ceram. Soc. 1959. Vol. 42. P. 413 – 423.

© 2012 г. Т.Я. Малышева, Р.М. Павлов
Поступила 7 сентября 2012 г.

УДК 041:66.012.37

В.В. Курносов, Л.А. Шульц

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ПРОБЛЕМЫ БЕЗОКИСЛИТЕЛЬНОГО НЕОБЕЗУГЛЕРОЖИВАЮЩЕГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА СТАЛИ В ТОПЛИВНЫХ ПЕЧАХ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ*

Относительно высокотемпературному нагреву ($1150\text{--}1250^\circ\text{C}$) сталь подвергается перед ее обработкой

давлением. К контролируемым по углероду сталям относится почти половина нагреваемого в печах металла, например, шарикоподшипниковые стали с содержанием углерода 0,95 – 1,05 %; рессорно – пружинные (0,5 – 0,6 % С) и другие стали с содержанием углерода $> 0,2\%$.

* Работа выполнена в рамках гранта по постановлению Правительства РФ № 218 от 09.04.2010.

Для улучшения структуры и дальнейшего увеличения качественных показателей легированной стали в последние десятилетия обоснованы и исследованы новые технологии термической обработки слитков, в частности, диффузионного (гомогенизирующего) отжига. Разработаны новые методы и технологии высокотемпературной обработки подшипниковых сталей, в том числе непрерывного литья, в сочетании с нагревом под прокатку или ковку. Для этих сталей обосновываются ступенчатые высокотемпературные режимы нагрева, позволяющие добиться максимального снижения дендритной ликвации Cr, Si, Mn, C и (по данным Укрнииспецстали) повысить долговечность службы подшипников на 30 – 70 %, контактную прочность на 20 – 60 %, снизить структурную полосчатость на 1 – 2 балла. Общая длительность выдержки ступенчатого высокотемпературного отжига шарикоподшипниковых сталей 12 – 15 ч, температура 1180 – 1280 °С. Аналогичные диффузионные режимы гомогенизации разработаны для многих других легированных сталей.

Однако, несмотря на значительное повышение качественных показателей гомогенизированного металла, пока диффузионный отжиг легированной литой стали не вошел в технологические нормативы по их производству. При длительной высокотемпературной выдержке металла, необходимой для проведения гомогенизации, без применения защитной атмосферы, окисляется до 4 – 6 % металла, а глубина обезуглероженного слоя средне- и высокоуглеродистой стали может достигать 1,5 – 2,5 мм, т.е. в итоге такая термообработка приведет почти к 10 %-ной потере металла, что не рентабельно. Выход из создавшегося положения при высокотемпературной обработке только один – нагрев, выдержка, а при необходимости и контролируемое охлаждение металла в защитной атмосфере.

Аспекты решения проблем необезуглероживающего нагрева стали в безокислительной по отношению к железу атмосфере находятся в области взаимодействия с углеводородами газовой фазы. Основным потенциальным источником углеводородов, как и наиболее распространенным источником энергии, в высокотемпературных печах кузнечно-штамповочных, прокатных и термических цехов является природный газ.

Углеводороды в печах для нагрева металла перед его обработкой давлением или в условиях диффузионного (гомогенизирующего) отжига будут разогреты до 1200 – 1400 °С, что приведет к их крайней неустойчивости и в отсутствие кислорода они быстро распадутся на углерод и водород. Углеродный продукт, образующийся при этих температурах и отличающийся низкой химической активностью, представляет два класса: пироуглерод (или слоистый, блестящий углерод) и углерод в дисперсном состоянии – сажа (диаметр частиц обычно не превышает 100 нм). Пороговая (критическая) концентрация образования сажи в смеси CH_4 – N_2 в зависимости от температуры составляет (% об):

1000 °С – 63; 1100 °С – 21; 1150 °С – 14,5; 1200 °С – 8, 1300 °С ~ 2. Пироуглерод образуется на горячих поверхностях при пороговых концентрациях существенно меньших, чем при образовании сажи. Его образование с заметной скоростью наблюдается уже при температуре 850 – 900 °С, образование сажи – выше 1100 °С [1]. Пироуглерод, обычно обнаруживаемый на поверхности стальных заготовок при использовании в качестве науглероживающего газа чистого природного газа или продуктов его неполного горения при коэффициенте расхода воздуха $n < 0,25$ и температуре 1000 – 1100 °С, приводит, несмотря на наличие углеводородов в газовой фазе, сначала к замедлению, а затем к полному прекращению науглероживания металла.

Пороговые концентрации образования углерода в продуктах горения углеводородных топлив, обычно содержащих окисляющие углерод газы H_2O , CO_2 , возрастают. Наличие же свободного кислорода в таких газах вообще исключает выделение в них свободного углерода.

Термодинамически равновесные концентрации метана в газовой фазе значительно ниже пороговых образования свободного углерода. Так, равновесное содержание метана в смеси метана и водорода при $P = 0,1$ МПа, рассчитанное А.А. Введенским и А.В. Фростом [2], при различной температуре составляет (% об): 1100 °С – 0,76; 1200 °С – 0,49; 1300 °С – 0,33; 1400 °С – 0,24; 1500 °С – 0,19. Содержание метана в его равновесных продуктах неполного сгорания при $P = 0,1$ МПа, в зависимости от температуры и коэффициента расхода воздуха n составляет (% об): 818 °С и $n = 0,25$ – 0,944; 919 °С и $n = 0,25$ – 0,306; 1118 °С и $n = 0,3$ – 0,001; 1273 °С и $n = 0,3$ – $< 0,00001$ [3]. Равновесное содержание CH_4 в используемом в промышленности эндогазе при $n = 0,26$ (% об): 900 °С – 0,13; 950 °С – 0,05 [4]. Равновесный углерод в высокотемпературных продуктах сгорания природного газа образуется при максимальном $n \approx 0,25$, неравновесный в молекулярно перемешанных газах – при $n = 0,48$ – 0,5.

В целом, концентрация метана в газовой фазе, полученной путем неполного сжигания или каталитической конверсии природного газа воздухом, содержащей CO , CO_2 , CH_4 и N_2 , даже в условиях равновесия со свободным углеродом при температуре более 1100 °С не превышает 0,001 %.

Время достижения полного внутреннего равновесия компонентов продуктов неполного сгорания природного газа и других топлив относительно длительно. Однако, по различным источникам, в высокотемпературных условиях (> 1100 °С) время на достижение 90 % равновесия не превышает 0,1 с. Исследования, проведенные при температуре 1100 – 1500 °С [1], показали, что в продуктах полного сгорания образование новых сажевых частиц прекращается за время, меньшее 10^{-3} с после ввода в них метана. Равновесие компонентов реакции водяного газа при температуре 1100 – 1500 °С

устанавливалось также примерно за 10^{-3} с. Константа скорости процесса роста пироуглерода на образовавшихся сажевых частицах, например, при увеличении температуры с 1127 до 1327 °С возросла с $4,93 \cdot 10^{-4}$ до $4,02 \cdot 10^{-3}$ г·см⁻²·с⁻¹·атм⁻¹, что соответствует энергии активации (по Аррениусу) около 230 кДж/моль. До установления равновесия при образовании свободного углерода в газах обнаруживался ацетилен C₂H₂ (до 2,8 – 3 %), обладающий на порядок большей активностью, чем метан.

Логарифм константы скорости образования пироуглерода гетерогенного разложения метана, имеющей первый порядок по метану, по усредненным данным различных авторов составляет: 1000 К – (–12); 1250 К – (–8); 1500 К – (–5,6); 1750 К – (–4) [1]. Из приведенных данных следует, что с увеличением температуры процесса с 1000 до 1750 К скорость реакций с участием метана увеличивается на 8 порядков, с 1250 до 1500 К – на 2,4 порядка, т.е. все процессы с участием метана, естественного пиролиза или его конверсии при температуре обработки стали давлением и диффузионного отжига резко ускоряются и его содержание в газовой фазе практически все больше приближается к равновесному. Примерно в тех же пределах изменяются константы скорости гетерогенного разложения метана при науглероживании стали. При этом энергия активации процессов роста пироуглерода и науглероживания стали составляет относительно близкие величины – в среднем 230 – 250 кДж/моль [4].

При высокой температуре скорости пиролиза углеводородов и поверхностного процесса образования углерода становятся настолько большими, что в целом результат взаимодействия газовой фазы с поверхностью контролируется в основном только скоростью диффузии молекул углеводорода к ней.

Учитывая приведенные данные, характеризующие неустойчивость углеводородов при повышенной температуре, остановимся на некоторых особенностях решения подобных задач в относительно низкотемпературных (в подавляющем большинстве случаев до 950 °С) термических печах, широко используемых в промышленности [4 – 6].

В термических печах для предохранения стали от обезуглероживания или науглероживания наибольшее распространение получил их нагрев с применением таких защитных контролируемых атмосфер: азотоводородных (5 – 10 % H₂) с низким содержанием H₂O [температура точки росы (т.т.р.) (–40) – (–60) °С]; экзогаз с концентрацией CO и H₂ в сумме около 5 % и низким содержанием CO₂ и H₂O, т.т.р. (–40) – (–60) °С; эндогаз, содержащий после очистки примерно 20 % CO, 40 % H₂, 0,3 – 0,5 % CO₂, т.т.р. 0 °С. В низкотемпературных условиях эти атмосферы при необезуглероживающем нагреве могут применяться без добавления в них углеводородов (прежде всего метана природного газа). При этом, при содержании CO, например, в смеси

CO–CO₂ больше 1 % CO и температуре < 800 К, наряду с выделением свободного углерода по реакции Белла – Будуара (волокнистого или нитевидного) наблюдается окисление железа с образованием магнетита Fe₃O₄.

С повышением температуры до 1000 К и более все перечисленные атмосферы по отношению к железу становятся безокислительными, а по отношению к углероду стали или свободному углероду – обезуглероживающими или окисляющими углерод. Для повышения их углеродного потенциала в этом случае к ним добавляют метан или другие углеводороды. Обязательным условием применения таких атмосфер с углеводородами (реакционно-активных атмосфер) является их интенсивная принудительная циркуляция, обеспечивающая равномерное взаимодействие газов с поверхностью металла. Концентрация метана в таких атмосферах обычно намного превышает равновесную по отношению к углероду и с увеличением температуры их активность в процессах науглероживания стали резко возрастает. Данные обработки экспериментальных результатов взаимодействия углеродистой стали с подобными атмосферами свидетельствуют о том, что они описываются уравнением Аррениуса с энергией активации процесса науглероживания около 230 – 250 кДж/моль. Заметное влияние на кинетические показатели науглероживания стали в таких атмосферах оказывают гомологи метана, обычно присутствующие в природном газе (C₂H₆, C₃H₈, C₆H₁₄ и др.), а также генерируемые при его пиролизе различные новые углеводороды и радикалы. Например, воздействие на углеродный потенциал смеси CH₄ – N₂, H₂O (H₂O – 0,6 %) при 900 °С и 0,1 % этана почти равнозначно 17 % метана [4].

Результаты термической обработки стали без обезуглероживания в перечисленных атмосферах, особенно в экзогазе, сильно зависят от попадания кислорода воздуха или влаги в печь, подготовки (травление, промывка, просушка) и чистоты поверхности обрабатываемого металла, т.е. от возможного загрязнения применяемых атмосфер окислительными газами. В этом отношении особые требования предъявляются к герметичности термических печей. Такие печи обязательно оснащаются продуваемыми защитным газом загрузочными шлюзами и тамбурами. Причем, для предотвращения значительных подсосов воздуха, загрузка и выдача металла, например в проходные толкательные или камерные печи, осуществляется через тамбуры, располагаемые ниже уровня их пода. Характерный рабочий режим изменения влажности экзогаза (5 % H₂; 0,05 % CO₂; 0,5 % CO; ост. N₂) или смеси H₂–N₂ в термической печи с радиантными трубами для необезуглероживающего нагрева до 780 °С (с выдержкой 3 ч) бунтов проволоки из стали 50ХФА: исходная влажность газа – (–55) °С, колебание влажности в рабочем объеме – (–35) – (–40) °С, в продуваемой защитным газом шлюзовой камере – (+20) – (–32) °С. Естественно, соответствующие эле-

менты конструкции и технологии, обеспечивающие сохранность атмосферы и герметичность рабочего пространства, должны быть и у высокотемпературных печей для обезуглероживающего нагрева стали перед пластической деформацией. Уместно подчеркнуть, что используемые в приведенном примере атмосферы не содержали углеводородов, а практически обезуглероживающий нагрев достигался при пороговой влажности газа, т.т.р. -40°C , при которой его реакционная способность была близка к нулю.

Анализируя приведенные данные работы термических установок с неактивными атмосферами, были все основания полагать, что применение контролируемой атмосферы с нулевой реакционной способностью для обезуглероживающего высокотемпературного нагрева стали в прокатных и кузнечных печах может оказаться наиболее перспективным технологическим направлением. Исследования подтвердили эту мысль.

Как было установлено опытным путем, в случае применения активных атмосфер, при увеличении углеродного потенциала атмосферы с $0 - 0,1$ до $0,5 - 1,7\%$, приведенный коэффициент расхода воздуха с учетом введенного дополнительно в продукты неполного горения природного газа при $n = 0,5$ снижался до $n \approx 0,3$. Атмосфера, из-за обильного выделения сажи, становилась полностью непрозрачной. Температура в печи резко снижалась. Несмотря на повышенные скорости движения атмосферы ($Re > 5000$) добиться равномерного содержания углерода по поверхности даже относительно небольших образцов из углеродистой стали не удалось – содержание углерода в поверхностном слое изменялось от $0,4$ до $1,5\%$. Содержание же углерода в опорной поверхности образцов сохранялось на уровне $0,1\%$. При скорости газов $0,2 - 1,5$ м/с ($Re = 100 - 1000$) содержание углерода по длине пластины и периметру цилиндрического образца изменялось соответственно в 9 и 6 раз. Содержание ацетилена в набегающем на образцы потоке при $n = 0,3 - 0,35$ составляло $1,5 - 1,8\%$ [6].

Исследования процессов нагрева стали при многократном чередовании атмосферы природного газа и продуктов его сгорания при $n = 0,5$ проводили на ЭВМ [6]. Углеродный потенциал атмосфер соответственно принимали $0,1$ и $2,4\%$. Расчеты показали, что при проведении такого циклического науглероживания продолжительностью $20 - 30$ мин глубина обезуглероженного слоя неокисленной стали против первоначального может быть уменьшена примерно в 3,5 раза и снижена до $0,25 - 0,3$ мм. Однако проблемы сажеобразования и равномерности восстановления углерода по поверхности заготовок целиком остаются и в этом случае. При этом среднецикловое значение коэффициента расхода воздуха (окислителя) также снижается до $0,3 - 0,35$ и сохраняются проблемы образования сажи и достижения необходимой температуры.

Для подтверждения возможности осуществления технологии обезуглероживающего нагрева с применением атмосферы с почти нулевой реакционной способностью по углероду, помимо многочисленных лабораторных опытов, был проведен промышленный эксперимент с нагревом блюмов из шарикоподшипниковой стали в методической печи при их муфельировании и импульсной подаче в зону нагрева металла природного газа. Время импульса составляло 4 с, паузы – 300 с, объемная скорость холодной смеси $0,02 - 0,03$ с $^{-1}$.

Ожидаемые положительные результаты проведенного промышленного гомогенизирующего нагрева (отжига) практически полностью подтвердились [6]. При этом общий расход природного газа в муфель за весь период гомогенизации (12 ч при 1200°C) не превысил $1,5$ м 3 или $0,2$ м 3 /м 2 поверхности блюмов, $0,45$ м 3 /т. Блюмы, нагретые в муфеле, имели чистую матовую поверхность без каких-либо видимых следов окисления металла. Глубина обезуглероженного слоя охлажденных на воздухе блюмов составила $0,2 - 0,25$ мм. На блюмах сравнения, нагретых в печи около муфеля, средняя толщина окалина составляла 7 мм ($\text{FeO} - 4,5$ мм, $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 2,5$ мм), что соответствует толщине окисленного металла $2,45$ мм или для блюмов сечением 250×250 мм – 4% угара. Глубина обезуглероженного слоя на блюмах сравнения – $1,5$ мм, т.е. общие потери металла при гомогенизации в продуктах полного горения и механическом удалении обезуглероженного слоя достигли бы $6,5\%$ (при сечении заготовки 200×200 мм – 8% ; 150×150 мм – $10,5\%$; 100×100 мм – $15,5\%$).

Выполненные исследования и их результаты позволяют сформулировать следующие отправные моменты возможных решений проблемы обезуглероживающего высокотемпературного нагрева стали с применением муфельирования металла и импульсной подачи в него газа.

- Типы печей – проходные толкательные для нагрева металла перед обработкой давлением и совмещенным с нагревом под прокатку диффузионным отжигом, камерные кузнечные, с выкатным подом для гомогенизирующего отжига слитков.
- Режим сжигания топлива – двухстадийный с аэродинамическим разделением рабочего пространства и созданием безокислительной атмосферы в зоне расположения нагреваемого металла [7] и укрывающего его муфеля.
- Конструкция и материал муфеля: в проходных печах – ковровый с песочными затворами (шамот, магнезит) и опорой на толкаемый металл через продольные закрепленные к поперечным балкам стеллюги, из среднеуглеродистой стали; в камерных и печах с выкатным подом – коробчатый из среднеуглеродистой стали и карборунда.

- 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