

6. *Металлургия стали* / В. Я. Явойский [и др.]. – М.: *Металлургия*, 1973.
7. *Исследование непрерывной разливки стали* / под ред. Дж. Лиина; пер. с англ. – Брюссель, 1977; М.: *Металлургия*, 1982.
8. Патент ВУ 2250 U 2005.12.30.
9. *Стеценко, В. Ю.* Повышение эффективности охлаждения отливок из силуминов при литье закалочным затвердеванием / В. Ю. Стеценко, С. Л. Радько, С. А. Харьков // *Литье и металлургия*. – 2006. – № 2. – С. 128–129.

УДК 669.187.2:621.365.22

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, д-р техн. наук (БНТУ),
А. В. МАТОЧКИН (ОАО «Завод «ЛЕГМАШ»»),
С. В. КОРНЕЕВ (БНТУ)

РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ В ДУГОВЫХ ПЕЧАХ

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) являются энергоемкими агрегатами, и эффективность их работы зависит как от применяемых шихтовых материалов и технологии выплавки, так и от конструктивных особенностей самих печей. Среди направлений повышения эффективности работы ДСП можно выделить два основополагающих: интенсификацию процесса и соответственно уменьшение длительности цикла плавки; минимизацию потерь энергии, т. е. увеличение КПД печи. Мероприятия по интенсификации процесса иногда находятся в противоречии с уменьшением потерь энергии, например увеличение мощности трансформатора, как правило, приводит к уменьшению КПД печи. В то же время предварительный подогрев металлошихты удаляемыми из печи газами положительно влияет как на скорость расплавления, так и на уровень тепловых потерь. Сокращение цикла плавки в целом приводит к уменьшению потерь через ограждающие конструкции печи.

Для современной технологии выплавки стали в дуговых печах характерны следующие энерготехнологические аспекты, позволяющие реализовать основные направления повышения эффективности работы: использование топливно-кислородных горелок для

интенсификации нагрева металлошихты непосредственно в печи; вдувание кислорода; донная продувка металла инертными газами; плавка стали с использованием остатка металла и шлака от предыдущей плавки (работа с болотом); использование качественной металлошихты и оптимальная шихтовка плавков; дожигание отходящих газов в рабочем пространстве печи.

Обеспечение рационального режима горения дуг. В настоящее время вопросы обеспечения рационального режима горения дуг сводятся к совместному рассмотрению электрического и технологического режимов плавки. Мощность энергии, выделяемая на дугах, зависит от силы тока, сопротивления подводящей сети и нагрузочной характеристики трансформатора.

Для условий ДСП-100 РУП БМЗ при работе на верхних ступенях с токами 45–55 кА потери в «короткой» электрической сети составят 1,823–2,723 МВт (при сопротивлении водоохлаждаемых шин короткой сети 0,3 мОм), т. е. увеличение силы тока на 22 % увеличивает потери на 50 %. Таким образом, с энергетической точки зрения, более выгодно работать с высокими значениями напряжений и меньшими токами. В то же время в период проплавления колодцев высокие напряжения и малые токи (длинные дуги) при одинаковой вводимой мощности приводят к нестабильности работы из-за малой степени ионизации дугового промежутка и частых обрывов дуги (погасание и последующее зажигание). В период горения дуг на жидкую ванну при недостаточном экранировании дуг излучение будет попадать на водоохлаждаемые панели, что несколько снижает КПД дуг.

Таким образом, мощность энергии дуг, поглощаемая ванной и металлошихтой, находящейся в рабочем пространстве печи, зависит от того, насколько дуги экранированы металлошихтой и шлаком и какая часть энергии попадает на водоохлаждаемые стеновые панели и свод.

Использование дополнительных источников энергии. Несмотря на то, что дуговая сталеплавильная печь предусматривает ведение плавки с использованием электрической энергии, выделяющейся в

дугах, практически все современные высокоомощные ДСП оснащаются средствами, позволяющими использовать энергию дополнительных источников. Как правило, доля электрической энергии в тепловом балансе составляет 55–65 %, остальная энергия поступает в рабочее пространство печи экзотермических реакций за счет окисления элементов металлошихты и с подаваемым в рабочее пространство топливом (природный газ, кокс и др.). При применении углеродсодержащего топлива, кроме анализа теплотехнических аспектов, необходимо рассматривать качество получаемого жидкого полупродукта, так как само топливо может содержать вредные для получаемой стали примеси, ухудшающие ее качество.

Экономическая эффективность использования дополнительных источников определяется как тепловым эквивалентом дополнительного источника энергии, так и соотношением цен на применяемое топливо и электрическую энергию, поэтому для анализа эффективности тепловых процессов при замещении электрической энергии органическим топливом целесообразно непосредственно определять экономию электрической энергии в стоимостном выражении при замещении 1 кВт · ч электрической энергии.

Экономия электрической энергии путем введения дополнительных источников в стоимостном выражении определяется по формуле

$$\Delta C_3 = \frac{C_3 - C_{O_2}}{\eta_3} - \sum_{i=1}^n \left(C_i \frac{3,6}{Q_{H-i}^P \eta_{1-i} \eta_{2-i}} \right),$$

где C_3 , C_i – стоимость 1 кВт · ч электрической энергии и стоимость 1 м³ газообразного или 1 кг твердого топлива для i -го источника энергии, у. е.; C_{O_2} – стоимость кислорода, подаваемого на окисление топлива, замещающего 1 кВт·ч электрической энергии, у. е.; η_3 – тепловой КПД дуг; Q_{H-i}^P – низшая рабочая теплота сгорания для i -го источника, МДж/м³ или МДж/кг; η_{1-i} , η_{2-i} – коэффициент использования топлива и тепловой КПД для i -го источника.

В качестве примера на рис. 1 показаны результаты определения эффекта от использования природного газа при сжигании его с применением кислорода и воздуха при различной температуре металлошихты.

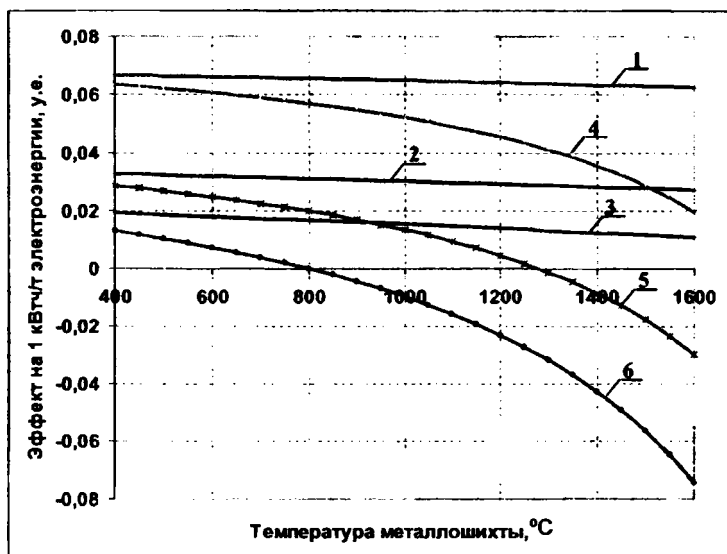


Рис. 1. Экономическая эффективность использования природного газа при сжигании его с применением кислорода и воздуха: 1 – сжигание природного газа в кислороде при цене газа 150 у. е. за 1 тыс.м³; 2 – то же при цене 200 у. е.; 3 – то же при цене 300 у. е.; 4 – сжигание с применением воздуха при цене газа 150 у. е.; 5 – то же при цене 200 у. е.; 6 – то же при цене 300 у. е.

Из анализа данных следует, что использование топливно-кислородных горелок может быть экономически целесообразно на всем протяжении периода плавки только при обеспечении герметичности печи. При применении в качестве окислителя воздуха (даже с небольшим коэффициентом избытка уже при достижении температуры поверхности металла 800–1000 °C) эффективность использования горелок приближается к нулю. Кроме того, эффективность нагрева металлошихты горелками будет существенно понижаться при подсосе холодного воздуха в печь.

Эзотермические реакции окисления элементов металлошихты. Расчеты показывают, что окисление элементов металлошихты дает в зависимости от ее вида от 15 до 35 % энергии в общем балансе.

Эффективность применения различных видов металлошихты в зависимости от ее стоимости, угара и суммарного тепловыделения от окисления примесей металлошихты предложено определять по формуле

$$\Delta C_3 = \frac{C_3 - C_{O_2}}{\eta_3} - \frac{C_{ших}}{1000 L} \cdot \frac{3,6}{\sum_{i=1}^n ([\%E]_i Q_{x_i} \eta_{1_i} \eta_{2_i})},$$

где $C_{ших}$ – суммарная стоимость 1 т металлошихты, включающая также стоимость шлакообразующих, у. е.; $L = 1 - \frac{\sum [\%E]_i}{100}$ – коэффициент использования металлошихты; $[\%E]_i$ – процент угара i -го элемента; Q_{x_i} – тепловой эффект реакции окисления i -го элемента, МДж/кг (тепловые эффекты реакций полного окисления углерода, кремния, марганца, фосфора и железа составляют 34,1; 31,13; 7,36; 25,01; 4,818 МДж/кг до FeO и 7,385 МДж/кг до Fe₂O₃ соответственно); η_{1_i} , η_{2_i} – коэффициент использования энергии окисления и тепловой КПД.

Отметим, что в коэффициенте использования металлошихты необходимо также учитывать процентное содержание мусора.

Коэффициент использования энергии окисления для углерода, содержащегося в металлошихте, можно определить по формуле

$$\eta_C = \left(1 - \frac{V_\delta c_v \Delta t_g 10^{-6} + q_{хим}}{Q_{x_C}} \right),$$

где V_δ – объем CO, выделяющегося при окислении 1 кг · C, м³/кг; c_v – теплоемкость CO, Дж/(м³·К); Δt_g – разность начальной температуры металлошихты и температуры CO, °C; $q_{хим}$ – химический

недожог углерода (максимальный равен 23,62 МДж/кг), МДж/кг; Q_{x_c} – тепловой эффект окисления углерода, МДж/кг.

При этом значение коэффициента для углерода $\eta_c = 0,18$, а эффективность использования энергии окисления углерода может быть значительно увеличена путем дожига окиси углерода в рабочем пространстве печи вдуванием кислорода, при этом уменьшается энергия химического недожога, входящая в коэффициент использования энергии окисления.

При определении η_{1_i} учтена специфика поведения примесей в процессе окисления, например переход углерода в удаляемые из печи газы в виде СО и СО₂ или переход кремния и других элементов в скачиваемый шлак, с поглощением теплоты шлакообразования.

Расчетное значение коэффициента использования энергии окисления кремния и других элементов, продуктами реакции окисления которых являются шлакообразующие, выше, чем углерода, и, например, для кремния составляет $\eta_{Si} = 0,475$. Тепловой КПД η_{2_i} при окислении элементов в ванне расплава $\eta_{2_i} = 1$.

На рис. 2 приведены результаты расчета эффективности использования некоторых видов металлошихты.

Безусловно, необходимо учитывать, что химический состав металлошихты известен лишь приближенно, поэтому приведенная методика определения коэффициентов является достаточно точной по отношению к общей точности результатов из-за разброса характеристик металлошихты, относящейся к одной категории лома.

Утилизация теплоты отходящих из печи газов. В связи с высокой температурой отходящих из рабочего пространства дуговых печей газов (1100–1800 °С), а также их большим объемом (15–20 тыс. м³/ч) вопрос о рациональном использовании содержащейся в них теплоты до сих пор остается открытым. Анализ различных теоретических данных, а также производственного опыта эксплуатации дуговых сталеплавильных печей приводит к выводу, что проблему утилизации теплоты отходящих из печи газов следует рассматривать комплексно, учитывая такие факторы, как мощность привода системы газоочистки, особенности работы системы регулирования давления в печи, возможность многостадийного теплоисполь-

зования и т. д. В настоящее время на опыте работы многочисленных систем доказана высокая эффективность первой стадии использования энергии отходящих газов, заключающаяся в подогреве металлошихты, подаваемой в печь. Необходимо отметить, что в производственных условиях наиболее эффективными являются мероприятия, заключающиеся в обеспечении возврата части энергии обратно в технологический процесс либо в технологический процесс агрегатов, находящихся на расстояниях, обеспечивающих минимальные потери тепловой энергии при ее транспортировании. Теоретически возможно также использование устройств, вырабатывающих электрическую энергию, хотя сложность и стоимость оборудования, как правило, не позволяют эффективно использовать эту возможность.

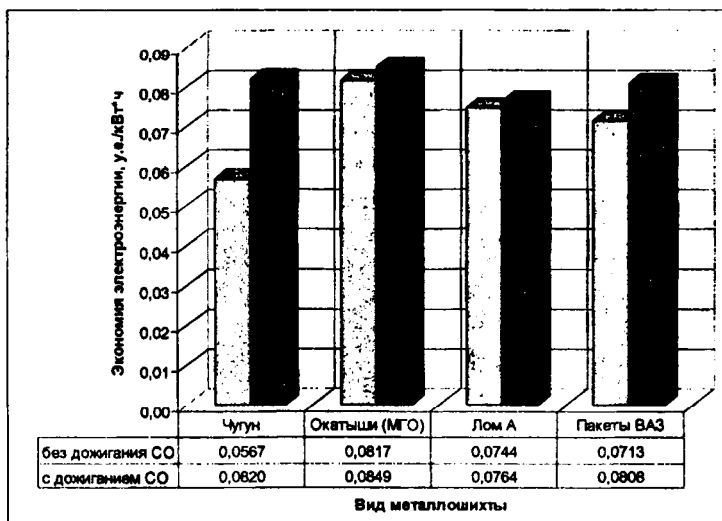


Рис. 2. Эффективность применения различных видов металлошихты (экономия электрической энергии за счет теплоты, выделяемой при окислении примесей)

Расчеты показывают, что при предварительном нагреве всей металлошихты до среднетемпературных температур 300–900 °С за счет теплоты удаляемых из печи газов можно получать экономию энергии в пределах 43–176 кВт · ч/т. Экономия электрической энергии при этом может составлять несколько меньшую величину, если уменьшают количество сжигаемого в рабочем пространстве при-

родного газа, так как электрическая энергия в общем балансе теплоты, вводимой в печь, составляет 55–65 %, а энергия всех источников в балансе в таком случае перераспределяется с увеличением доли электрической энергии. Основным моментом в вопросах определения экономии ресурсов при предварительном подогреве металлошихты остается влияние конструктивных и технологических параметров устройств подогрева металлошихты, а также свойств самой металлошихты на максимальные среднemasсовые температуры ее подогрева.

К концу 20-го века в электросталеплавильном производстве начали применять несколько систем подогрева лома, наибольшее распространение из которых получили шахтные подогреватели конструкций FUCHS, IHI, конвейерная Consteel и др. Данные, приводимые производителями печей с подогревателями металлошихты, используемых на многих зарубежных металлургических предприятиях, свидетельствуют об их высокой эффективности, так как установки позволяют производить подогрев от 60 до 100 % всей металлошихты, подаваемой в печь, до среднemasсовых температур 700 – 850 °С.

Опыт эксплуатации дуговых печей с предварительным подогревом показывает, что наиболее эффективной схемой подогрева металлошихты является подогрев в шахтах, непосредственно устанавливаемых на дуговых печах.

Для исследования влияния вида металлошихты на эффективность ее предварительного подогрева удаляемыми из печи газами разработана модель, которая предполагает сопряженный теплообмен между кусками металлошихты и удаляемыми из печи газами, с решением внутренней задачи теплопроводности численным методом и описывается системой уравнений

$$\rho_{\text{нас}} c_p S_k dz \frac{dT_M(z)}{d\tau} = \alpha(z)(T_g(z) - \bar{T}_s(z)) dF ;$$

$$c_{p_g} G_g dT_g = \alpha(z)(T_g(z) - \bar{T}_s) dF ;$$

$$\rho(T)c_p(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) ;$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(z)(T_g(x) - \bar{T}_s) ;$$

$$T(\tau = 0) = T_{M0} = \text{const} ; T_g(z = 0) = T_{g0} = f(\tau) ,$$

где $\rho_{\text{нас}}$ – насыпная плотность металлошихты; c_p – массовая теплоемкость металлошихты; S_k – площадь сечения шахты; dz – высота элементарного участка шахты; $dT_M(z)$ – изменение температуры металла на участке dz за время dt ; $\alpha(z)$ – коэффициент теплоотдачи от газов к поверхности кусков металлошихты; $T_g(z)$ – температура газа на элементарном участке dz ; $\bar{T}_s(z)$ – средняя температура поверхности металла на элементарном участке dz ; dF – площадь поверхности металлошихты на элементарном участке dz ; c_{p_g} – массовая теплоемкость газов; G_g – массовый расход газа; dT_g – изменение температуры газа на элементарном участке; ρ – плотность материала.

Необходимо отметить, что теплообмен кусков в модели происходит только с проходящим через слой металлошихты газом и в математической модели не учитывается продольная теплопроводность через слой металлошихты, так как градиент температур по длине шахты мал. Следует сказать, что предложенная физико-математическая модель позволяет использовать любую зависимость температуры газов на входе в шахту от времени. Так, в реальных условиях эксплуатации печи температура уходящих газов изменяется от 700 °С в начале плавки после завалки и подвалки до 1600–1700 °С в период продувки, причем при дожигании СО возможно повышение температуры до 1800–1900 °С.

Средняя температура поверхности на каждом расчетном участке по высоте шахты определяется из решения уравнения теплопроводности в двумерной постановке для отдельного куска металлошихты. Начальное условие определяется начальной температурой металлошихты, загружаемой в шахту, и температурой газов, покидающих рабочее пространство печи. Исходными данными для исследований являются средние размеры куска лома, насыпная плотность лома, масса и начальная температура, а также вид газа, его количество и температура.

После проведения серии расчетов при варьировании характерными размерами кусков металлошихты была получена зависимость

средней температуры подогрева металлошихты и температуры уходящих из шахты газов от размера куска и времени нахождения металлошихты в шахте (рис. 3).

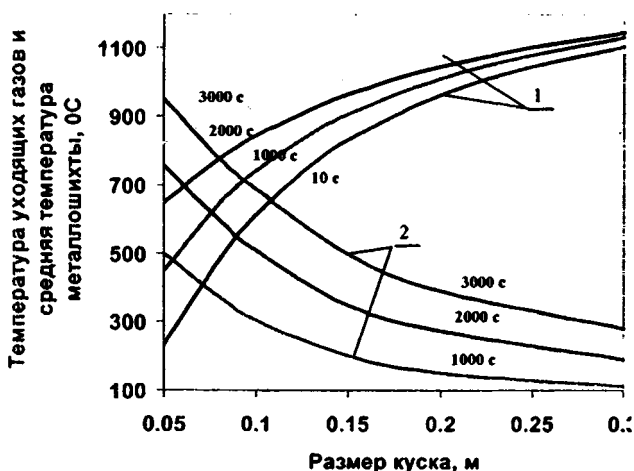


Рис. 3. Зависимость температуры подогрева лома от среднего размера куска металлошихты (насыпная плотность металлошихты, равная 1800 кг/м^3 , масса металлошихты, загруженная в шахту, — 60 т, температура удаляемых из печи газов на входе в шахту составляет $1400 \text{ }^\circ\text{C}$): 1 — температура уходящих газов; 2 — средняя температура металлошихты

Как следует из приведенных данных, металлошихта за 50 мин нагревается до среднемассовой температуры выше $900 \text{ }^\circ\text{C}$ только в случае кусков с толщиной менее $0,06 \text{ м}$. Для толщин кусков близких к $0,3 \text{ м}$, среднемассовая температура не превышает $300 \text{ }^\circ\text{C}$.

В связи с тем, что при осуществлении мероприятий по энергосбережению необходимо учитывать все возможные потери энергии, было определено влияние подогрева металлошихты в шахте ДСП на потребление электрической энергии системой удаления газов из печи. В качестве исходных данных были приняты данные по гидравлическому режиму печи ДСП-100 и условие о том, что этот режим (а следовательно, и эффективность удаления пыли и газов из

печи) не должен измениться при наличии шахты с металлошихтой. Показано, что прирост мощности, потребляемой системой газоочистки, может изменяться от 0,5 до 50 % в зависимости от сечения шахты. При уменьшении площади сечения шахты и соответственно увеличении высоты слоя, а также массы завалки аэродинамическое сопротивление слоя металлошихты будет существенно возрастать.

По результатам проведенных исследований можно предложить основные направления энергетической оптимизации электроплавки: оптимизацию состава металлошихты, использование в ДСП максимально возможного количества относительно дешевого органического топлива с окислением его чистым кислородом; увеличение количества кислорода, подаваемого в рабочее пространство для дожигания окиси углерода в период интенсивной продувки кислородом ванны с расплавом; изменение геометрических характеристик системы «дуга–шлак–металл» с целью максимальной отдачи электрической энергии металлу путем изменения соотношения ток/напряжение и применения технологии управляемого вспенивания шлака; наиболее полное использование теплоты удаляемых из печи газов для предварительного нагрева лома; оптимизацию гидравлического режима работы печи с целью исключения значительных подсосов холодного воздуха.

Заключение

Обеспечение рациональных режимов в высокомошных дуговых сталеплавильных печах заключается в сопряжении технологических операций, обеспечивающих высокие энерготехнологические показатели. Так, например, управляемое вспенивание шлака позволяет вести плавку на меньших значениях токов, чем без вспенивания при вводе аналогичной мощности электрической энергии, при этом общий КПД печи увеличивается.

На основе анализа данных эксплуатации дуговых печей, а также теоретических исследований определены пути повышения энергоэффективности работы дуговых сталеплавильных печей, заключающиеся в использовании дополнительных источников энергии в виде природного газа и кокса с дожиганием СО в рабочем пространстве, а также предварительного нагрева лома в шахтных подогревателях.

Предложена методика оценки экономической целесообразности применения органического топлива в процессе выплавки стали в дуговых печах, заключающаяся в определении энергетического эквивалента электрической энергии, вводимой в печь, в стоимостном выражении при замене ее энергией сжигания органического топлива, а также методика оценки эффективности применения металлошихты определенного химического состава.

УДК 621.746

Ю. А. САМОЙЛОВИЧ, д-р техн. наук (Екатеринбург, «Платан»),
В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, д-р техн. наук,
И. А. ТРУСОВА, д-р техн. наук,
С. М. КАБИШОВ, канд. техн. наук. (БНТУ)

СНИЖЕНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СТАЛЬНЫХ СЛИТКОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Для снижения химической неоднородности стальных слитков применяются разнообразные методы внешних воздействий, к числу которых относится пропускание электрического тока через кристаллизующийся расплав. В настоящей статье приводятся примеры снижения химической неоднородности стальных слитков при пропускании электрического тока и соображения о возможном механизме воздействия электрического тока на процесс кристаллизации стали. Реализация идеи воздействия электрического тока на затвердевающий стальной слиток сталкивается с чисто техническим затруднением, связанным со способом подключения электрического тока к слитку. Известно, что при непрерывной разливке стали используется индукционный метод электромагнитного перемешивания расплава, при котором индукторы расположены на определенном расстоянии (несколько сантиметров) от поверхности заготовки. Подобные устройства, основанные на применении бегущего электромагнитного поля, отличаются низким коэффициентом полезного действия, использованием источников тока повышенной мощности (до 1000 кВ · А), т. е. являются весьма дорогостоящими.