

**УДК 621.745.34**

**Ю.Н. ТУЛУЕВСКИЙ**, докт. техн. наук, профессор, консультант

Компания Preisman Technology Inc., Канада

**И.Ю. ЗИНУРОВ**, канд. техн. наук, директор

ООО НТП «Аконт», г. Челябинск, РФ

## ТОПЛИВОДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫЙ АГРЕГАТ НОВОГО ТИПА

Предложено оборудовать шахтные печи с непрерывным плавлением лома в жидком металле мощными газокислородными горелочными устройствами. При нагреве лома до 800 °С с расходом газа 15,5 м<sup>3</sup>/т и продувке ванны кислородом на границе шлак – металл 125-тонные топливодуговые сталеплавильные агрегаты имеют производительность 240 т/часи расход электроэнергии 200 кВт·час/т. Обладая также экологическими преимуществами, эти агрегаты способны успешно конкурировать с лучшими современными дугowymi сталеплавильными печами и заменять их.

**Ключевые слова:** шахтная печь, непрерывное плавление лома, плоская ванна, нагрев лома, газогорелочное устройство, кислородная продувка ванны, граница шлак – металл, топливодуговой сталеплавильный агрегат.

Успешное распространение конвейерных и шахтных печей, а также достижения обычных дуговых сталеплавильных печей (ДСП) осложнили проблему выбора наи-

более перспективного сталеплавильного агрегата для переработки лома. Во всех печах, перерабатывающих металлошихту, состоящую из лома, на его нагрев до точ-



ки плавления затрачивается три четверти полезного тепла, усвоенного металлом за всю плавку. Следовательно, производительность и экономичность дуговых печей в значительной степени зависят от энергетической эффективности процесса нагрева лома.

В последние годы с традиционным способом нагрева и плавления лома в рабочем пространстве печи (при завалке его сверху) успешно конкурирует новый технологический процесс – непрерывное плавление предварительно нагретого лома в жидком металле. Применение конвейерных печей Consteel убедительно показало, что этот способ, позволяющий работать с плоской ванной на протяжении всей плавки, имеет ряд существенных преимуществ. Наилучшими потенциальными возможностями для сочетания достоинств технологии плоской ванны с высокотемпературным предварительным нагревом лома, обеспечивающим максимальные показатели производительности и экономии электроэнергии, обладает новое поколение шахтных печей, оборудованных шахтой, установленной на тележке и приводимой к печи (по рабочей площадке) перпендикулярно ее поверхности (рис. 1). Нагретый отходящими газами лом непрерывно загружается из шахты в ванну печи небольшими порциями с помощью гидравлических толкателей через совмещенные окна в боковых стенках печи и шахты. Скорость загрузки лома поддерживается равной скорости его плавления в жидком металле, что позволяет использовать плоскую ванну [1].

Наряду с рассмотренными печами получили распространение и шахтные печи, в которых отходящие газы отводятся через шахту, расположенную над сводом печи. Порции лома удерживаются в шахте водоохлаждаемыми пальцами. Когда лом нагревается до требуемой температуры, пальцы раскрываются, и лом свободно падает в ванну через отверстие в своде. Затем пальцы закрываются, и на них поступает следующая порция лома. В современных печах этого типа ванна загружается двумя или тремя порциями лома, нагретого на пальцах [2]. По числу завалок такие печи не отличаются от ДСП с завалкой лома сверху двумя-тремя корзинами.

Действующие шахтные печи имеют существенные недостатки, которые не позволяют полностью реализовать потенциальные преимущества работы с плоской ванной и предварительно нагретым ломом. Основным минусом данной технологии является относительно низкая температура предварительного нагрева лома. Достоверных экспериментальных данных о значениях этого параметра нет, как и данных о тепловых балансах печей. Судя по некоторым публикациям, температура кусков лома в окне выгрузки его из шахты может достигать примерно 700–800 °С. Однако следует иметь в виду, что в этой зоне поверхность переднего слоя лома подвергается

прямому тепловому излучению рабочего пространства печи, так что указанные температуры намного превышают действительные среднемассовые температуры лома, расположенного у рабочего окна.

Можно показать, что достигнутые на практике реальные среднемассовые температуры лома  $t_n$  близки к 400 °С. Для этого воспользуемся зависимостью между  $t_n$  и снижением расхода электроэнергии  $\Delta E_{эл}$ , вызванным предварительным нагревом лома [1]:

$$\Delta E_{эл} = c_n \cdot t_n / \eta_{эл}, \tag{1}$$

где  $c_n$  – средняя теплоемкость лома, кВт·час/(кг·°С);  $\eta_{эл}$  – коэффициент полезного использования электроэнергии на нагрев жидкого металла в ванне печи;  $c_n \cdot t_n$  – энтальпия лома при табличных значениях  $t_n$  [3].

$$\eta_{эл} = \eta_c \cdot \eta_{дуг}, \tag{2}$$

где  $\eta_c$  – электрический КПД короткой сети, учитывающий электрические потери в трансформаторе и вторичном токопроводе;

$\eta_{дуг}$  – тепловой КПД дуг, учитывающий потери тепла при теплопередаче от дуг к жидкому металлу.

Для современных шахтных печей, работающих с плоской ванной и дугами, практически постоянно погруженными в пенистый шлак, при оценке по максимуму можно принять:  $\eta_c = 0,93$ ;  $\eta_{дуг} = 0,90$ ;  $\eta_{эл} = 0,93 \cdot 0,90 = 0,84$ . Подставив максимальное значение  $\eta_{эл}$  в уравнение (1), можно определить минимальную величину  $\Delta E_{эл}$  для любого  $t_n$ .

Фактические расходы электроэнергии на действующих шахтных печах составляют  $300 \pm 15$  кВт·час/т, что примерно на 65–75 кВт·час/т ниже энергозатрат на печах без предварительного нагрева лома. Среднему значению  $\Delta E_{эл} = 70$  кВт·час/т согласно уравнению (1) соответствует средний уровень  $t_n = 400$  °С. Если бы действительные среднемассовые температуры лома достигали 700–800 °С, расходы электроэнергии на шахтных печах, как следует из уравнения (1), были бы близки не к 300, а к 200 кВт·час/т.

Относительно низкие температуры лома на современных шахтных печах объясняются влиянием трех факторов: недостаточной тепловой мощностью потока отходящих газов, малой продолжительностью нагрева лома и невысокой интенсивностью процесса теплопередачи от газов к лому, который может быть описан уравнением

$$Q = \alpha_v (t_r - t_n) \cdot \tau / \rho, \tag{3}$$

где  $Q$  – количество тепла, переданного лому за время его нагрева  $\tau$ , кВт·час/т;

$\alpha_v$  — объемный коэффициент теплопередачи от газов к лому, кВт/(м<sup>3</sup>·°С);

$t_r$  и  $t_n$  — средние за время нагрева температуры газов и лома, °С;

$\rho$  — объемная плотность слоя лома, т/м<sup>3</sup>.

Общая продолжительность плавки на современных 125-тонных печах составляет 30–33 мин, а доступное время нагрева лома  $\tau$  не превышает 20–23 мин. При малых  $\tau$  для высокотемпературного нагрева лома необходимы не только потоки газов большой тепловой мощности, но и высокие значения коэффициента  $\alpha_v$ . Увеличение  $\alpha_v$  может быть достигнуто за счет повышения скорости газов и более равномерного их распределения по сечению слоя лома.

Вторым существенным недостатком действующих шахтных печей является весьма ограниченная скорость плавления лома в жидком металле, что значительно снижает производительность этих печей по сравнению с лучшими современными ДСП (к примеру, производительность 120–130-тонных шахтных печей составляет около 150 т/час, а современных ДСП с такой же массой выпуска — более 200 т/час). Это объясняется недостаточной интенсивностью процесса теплопередачи от жидкого металла к погруженным в него кускам лома, которая определяется температурой металла и скоростью его перемешивания.

На печах, работающих с плоской ванной, невозможно ускорить плавление за счет повышения мощности трансформатора, как на ДСП, поскольку во избежание ускоренного износа футеровки обязательным условием новой технологии является поддержание температуры металла в период плавления на постоянном уровне — не выше 1560–1570 °С.

Этим объясняется вынужденное понижение (по сравнению с ДСП, не имеющих данного ограничения) мощности трансформаторов на шахтных печах, что значительно снижает производительность данных печей и является их недостатком. Ускорить плавление можно резким увеличением интенсивности перемешивания содержимого ванны при помощи более совершенных методов ее кислородной продувки.

Третий существенный недостаток шахтных печей, как и первый, связан с нагревом лома теплом отходящих печных газов. Он заключается в необходимости доведения температуры газов, покидающих шахту, до 900–950 °С с целью разложения содержащихся в загрязнителях лома высокотоксичных диоксинов и фуранов, которые выделяются при его нагреве. Это требует дополнительных затрат примерно 5 м<sup>3</sup> природного газа на тонну стали, что существенно снижает энергетическую эффективность процесса. Предпочитают строить шахт-

ные печи, игнорируя указанную необходимость, в тех странах, где не предъявляют жестких требований к защите окружающей среды.

Для того чтобы шахтные печи могли стать основными сталеплавильными агрегатами для производства стали из лома (возможности использования жидкого чугуна в печах в статье не рассматриваются, показатели таких печей определяются в основном долей чугуна в металлошихте), необходимо устранить их недостатки, введя в концепцию проектирования печи три новых элемента:

- нагрев лома в шахте не отходящими газами, а мощными газокислородными горелочными устройствами инжекторного типа до среднemasсовых температур от 800 °С;
- кислородную продувку ванны с расплавом высокотоксичными многословыми фурмами на границе шлак — металл, что обеспечивает его интенсивное перемешивание;
- отвод продуктов горения из шахты через рабочее пространство печи и четвертое отверстие в своде (такая прямоточная схема отвода газов позволяет избежать дополнительных энергетических затрат на разложение диоксинов и фуранов, при этом энергия отходящих газов может использоваться не на нагрев лома, а для других целей, например для производства пара энергетических параметров [3]).

#### **Система высокотемпературного нагрева лома в шахте инжекторными газокислородными горелочными устройствами**

Известные горелки непригодны для высокотемпературного нагрева лома в шахте. Газовоздушные горелки генерируют слишком большое количество продуктов горения, что делает невозможным их отвод через рабочее пространство печи. Факелы газокислородных горелок имеют слишком высокую температуру, при которой невозможно избежать чрезмерного окисления, оплавления и сваривания кусков лома. Это приводит к падению выхода годного, зависанию лома в шахте и препятствует равномерной выгрузке лома толкателями из шахты в ванну печи. Чтобы избежать указанных недостатков, продукты горения в горелочном устройстве должны иметь температуру не более 1100–1250 °С.

В разработанном устройстве требуемое снижение температуры продуктов горения достигается за счет рециркуляции газов. Образующаяся в устройстве газокислородная смесь разбавляется теми продуктами горения, которые уже прошли через слой лома и отдали ему тепло. Такую рециркуляцию газов обеспечивают горелочные устройства, которые создают в своей верхней части разрежение, а в нижней — избыточное давление.



На рис. 1 показана установка горелочного устройства 1 на шахте печи. Горючая смесь вводится в нижние слои лома патрубками 2 вблизи толкателя 3. Через патрубки 4 продукты горения всасываются в горелочное устройство из верхнего слоя лома или пространства над ним. Таким образом, до всасывания в устройство продукты горения проходят через весь слой лома в шахте, чем достигается необходимое снижение их температуры. Разрежение, создаваемое в патрубках 4, превышает разрежение в окне шахты для выгрузки лома, создаваемое тягой печи, в связи с чем только небольшая часть потока продуктов горения, составляющая примерно  $3 \text{ м}^3/\text{м}^3$  природного газа, направляется к окну выгрузки лома и удаляется через рабочее пространство печи в газоотводящий тракт. Большая часть потока газов проходит через слой лома снизу вверх, всасывается в горелочное устройство и непрерывно циркулирует по замкнутому контуру «устройство – лом».

Для того чтобы на 125-тонной шахтной печи при длительности плавки 31 мин и времени загрузки лома в ванну 20 мин обеспечить среднemasсовую температуру лома  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ , необходимы горелочные устройства общей мощностью 60 МВт. Если принять мощность одного устройства равной 15 МВт, на печи должны быть установлены четыре таких устройства – два на стенке шахты, противоположной окну выдачи лома, и по одному на

боковых стенках. В этом случае будет обеспечено достаточно равномерное распределение потоков газов по сечению шахты.

Общее количество газов, проходящих через лом во время его нагрева, определяется выбором параметров горелочных устройств и в рассматриваемом примере составляет  $40 \cdot 10^3 \text{ м}^3$  в час. Часть этого потока удаляется из шахты с объемной скоростью  $17,5 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{час}$  ( $3 \text{ м}^3/\text{м}^3$  природного газа), остальные газы непрерывно циркулируют через лом и горелочные устройства с объемной скоростью  $22,5 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{час}$ . На обычной 125-тонной шахтной печи часовой объем отходящих газов изменяется по ходу плавки, достигая максимального значения  $18 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{час}$ . На шахтной печи с горелочными устройствами мощностью 60 МВт поток газов через лом постоянен и превышает этот максимум более чем вдвое, что создает весьма благоприятные условия для более равномерного нагрева лома по высоте слоя и увеличения объемного коэффициента теплопередачи  $\alpha_v$ , а следовательно, способствует достижению среднemasсовых температур нагрева лома до  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  и выше.

#### Кислородная продувка ванны высокостойкими фурмами, погруженными до границы шлак – металл

На шахтной печи с массой выпуска 125 т количество перерабатываемого лома составляет примерно 137 т. При 20-минутной загрузке лома в ванну необходима скорость плавления  $6,8 \text{ т/мин}$ . Такая скорость плавления (и равная ей скорость загрузки) достигалась только на самой большой конвейерной печи Consteel (в Таиланде) емкостью 300 т с массой выпуска 187 т и массой «болота» (остаточного расплава) 113 т. На печах Consteel емкостью 150–200 т скорость плавления не превышала 3–4 т/мин, возрастающая пропорционально увеличению количества жидкого металла в ванне, что объясняется повышением интенсивности естественных процессов турбулентного и циркуляционного перемешивания [1]. Механизм плавления лома в жидком металле в печах Consteel и шахтных одинаков, поэтому для ускорения плавления в шахтных печах тоже следует увеличить массу «болота» (но на небольших печах достигнуть ее оптимального уровня не получится).

С увеличением температуры предварительного нагрева лома скорость его плавления возрастает. Однако зона непрерывной загрузки лома в ванну шахтной печи весьма ограничена. Для того чтобы избежать переохлаждения жидкого металла в данной зоне и связанного с этим падения скорости плавления, необходимо, как уже подчеркивалось ранее, увеличить интенсивность перемешивания – например с помощью эффективного метода интенсивной продувки ванны кислородом на границе шлак – металл. Данный метод в течение многих

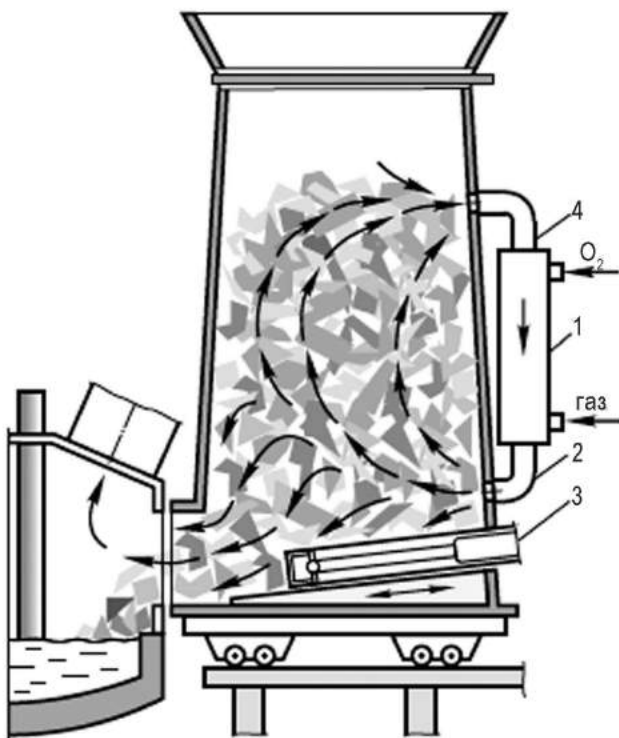


Рисунок 1 – Шахтная печь:

1 – газокислородное горелочное устройство;  
3 – гидравлический толкатель; 2, 4 – патрубки  
(стрелками показаны направления потоков газов в шахте)



лет использовался на мартеновских печах России и Украины. Было доказано, что по сравнению с продувкой кислородными струями сверху под углом к поверхности ванны продувка на границе шлак – металл увеличивает скорость плавления на 20–30 % при значительно меньшем расходе кислорода. Так как гидродинамические характеристики плоских ванн мартеновских и дуговых печей полностью совпадают [4], кислородную продувку на границе шлак – металл необходимо использовать и на шахтных печах.

Для применения продувки через погруженные в металл кислородные фурмы необходимо увеличить их стойкость. На мартеновских печах продувку осуществляли через многосопловые вертикальные фурмы, которые вводились в рабочее пространство печи через отверстия в своде. В результате исследований, проводившихся на многих заводах, были разработаны высокостойкие фурмы, надежно работающие не только на границе шлак – металл, но и при погружении в металл на глубину 100–150 мм, что еще более ускоряет обезуглероживание. Вместе с тем продувка с погружением замедляет нагрев металла из-за его охлаждения фурмами, поэтому она не получила широкого распространения [5].

Граница шлак – металл в процессе плавления лома перемещается вверх, что требует корректировки положения фурм. Были разработаны и широко применялись на практике два способа непрерывного определения расстояния (с точностью 30 мм) от кончиков фурм до границы шлак – металл. С их помощью управляли положением фурм при продувке в автоматическом режиме [5]. Опыт эффективных методов продувки ванны в мартеновском производстве необходимо учитывать и при производстве электростали.

**Топливодуговой сталеплавильный агрегат**

Шахтные печи с массой выпуска 125 т, перерабатывающие лом, предварительно нагретый до 800 °С, и оборудованные новыми эффективными средствами для кислородной продувки через погруженную в расплав фурму, будут иметь следующие расчетные показатели: продолжительность плавки – 31 мин; производительность – 242 т/час; удельный расход электр

троэнергии на тонну стали – 200 кВт·час/т, природного газа – 15,5 м<sup>3</sup>/т, кислорода в горелочных устройствах – 31 м<sup>3</sup>/т, кислорода на продувку ванны – 25 м<sup>3</sup>/т. Максимальная мощность трансформатора составит 80 МВА (64 МВт). Такая мощность необходима для быстрого нагрева расплава (в течение не более 5 мин) до температуры выпуска на заключительном этапе плавки. В период плавления лома необходимая мощность составит 70 % от максимальной.

Примерное равенство мощности горелочных устройств (60 МВт) и активной электрической мощности, практически полное замещение электроэнергии энергией топлива позволяют назвать эти шахтные печи нового типа топливодуговыми сталеплавильными агрегатами (ТДСА). В условиях Украины общие энергетические затраты на газ, кислород, электроэнергию и электроды на ТДСА на 25 % ниже по сравнению с аналогичными затратами на современных ДСП (табл. 1).

**Снижение затрат на газоудаление и экологические преимущества**

Для печей с непрерывной загрузкой лома в ванну гидравлическими толкателями разработаны и используются различные системы завалки лома в шахту корзинами. Системы EPS и ESS позволяют производить эту операцию под током, не прерывая работу печи, без разгерметизации шахты и неорганизованных пылегазовых выбросов в цех. Такие выбросы приходится улавливать экономически неэффективными способами (обычно с помощью вытяжного зонта над печью). В результате применения системы EPS количество газов, требующих очистки, и соответствующие эксплуатационные затраты снижаются примерно на 20–30 % [6].

Кроме того, значительно уменьшаются выбросы в атмосферу парникового газа CO<sub>2</sub>. Этот экологический эффект необходимо оценивать наиболее объективным способом в масштабах двух взаимосвязанных отраслей промышленности – производства электроэнергии (на ТЭС) и электростали. На ТДСА выбросы CO<sub>2</sub> возрастают на 30,5 кг/т стали по сравнению с ДСП из-за увеличения расхода газа на 10,5 м<sup>3</sup>/т и кислорода – на 16,3 м<sup>3</sup>/т. Однако в системе ТДСА – ТЭС суммарные выбросы

**Таблица 1 – Сравнение эксплуатационных затрат на ТДСА и ДСП**

Эксплуатационные затраты	Цена за единицу, грн	ТДСА		ДСП	
		Расходы на 1 т стали	Затраты, грн/т	Расходы на 1 т стали	Затраты, грн/т
Электроэнергия	0,85 грн/кВт·час	200,0	170,0	370,0	315,0
Природный газ	4,00 грн/м <sup>3</sup>	15,5	62,0	5,0	20,0
Кислород	0,80 грн/м <sup>3</sup>	56,0	44,8	40,0	32,0
Электроды	30,00 грн/кг	0,80	24,0	1,1	33,0
Итого			300,8		400,0



резко снижаются благодаря уменьшению энергозатрат на ТДСА на 170 кВт·час/т стали (табл. 1).

Коэффициент полезного использования энергии угля на ТЭС ( $\eta_{\text{тэс}}$ ) равен 0,41, а КПД линий электроснабжения ( $\eta_{\text{эл.л.}}$ ), учитывающий все потери электроэнергии при трансформациях напряжения в электрических сетях, равен 0,92. Таким образом, только около 38 % энергии, полученной от сжигания угля на ТЭС, достигают ТДСА или ДСП ( $\eta_{\text{тэс}} \cdot \eta_{\text{эл.л.}} = 0,377$ ). При снижении расхода электроэнергии на ТДСА на 170 кВт·час/т стали количество тепла от сжигания угля на ТЭС может быть уменьшено на  $170/0,377 = 450,9$  кВт·час/т. При теплоте сгорания угля 7,07 кВт·час/кг и содержании в нем 80 % углерода такое сокращение обеспечивает снижение выбросов  $\text{CO}_2$  на ТЭС на 187 кг/т стали. С учетом увеличения выбросов на ТДСА на 30,5 кг/т итоговое снижение выбросов составит 156,5 кг/т стали.

## ВЫВОДЫ

Анализ недостатков действующих шахтных печей и механизма плавления лома в жидком металле позволил предложить концепцию прямооточного топливотопивого сталеплавильного агрегата, важнейшими отличительными особенностями которого являются:

- нагрев лома до 800 °С мощными газокислородными горелочными устройствами с низкой температурой пламени (энергия продуктов горения используется для других целей);
- применение кислородной продувки содержимого ванны многосопловыми фурмами на границе шлак – металл с поддержанием фурм в период плавления на уровне указанной границы, что обеспечивается автоматической следящей системой (такая продувка, увеличивая интенсивность перемешивания, резко повышает скорость плавления лома в жидком металле).

Запропоновано обладати шахтні печі з безперервним плавленням брухту в рідкому металі потужними газокисневими пальниковими пристроями. При нагріванні брухту до 800 °С з витратою газу 15,5 м<sup>3</sup>/т і продувці ванни киснем на кордоні шлак – метал 125-тонні паливно-дугові сталеплавильні агрегати мають продуктивність 240 т/год і витрату електроенергії 200 кВт·год/т. Маючи також екологічні переваги, ці агрегати здатні успішно конкурувати з кращими сучасними дуговими сталеплавильними печами і замінювати їх.

125-тонный прямооточный ТДСА с трансформатором 80 МВА, оборудованный разработанными горелочными устройствами мощностью 60 МВт для нагрева лома до 800 °С и подвижными кислородными фурмами для продувки ванны на границе шлак – металл, может при расходе газа 15,5 м<sup>3</sup>/т стали иметь производительность 240 т/час и затраты электроэнергии 200 кВт·час/т стали. Такие сталеплавильные агрегаты являются следующим этапом развития шахтных печей, работающих с плоской ванной. Благодаря своей высокой производительности, энергетическим и экологическим преимуществам они способны успешно конкурировать с лучшими современными ДСП и заменять их при самых жестких нормах по защите окружающей среды.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Toulouevski Y.N., Zinurov I.Y. Innovation in Electric Arc Furnaces. Scientific Basis for Selection. – The second edition. – New York : Springer, 2013. – 282 с.
2. Abel M., Dorndorf M., Hein M., et.al. Highly productive electric steelmaking at extra low conversion costs // MPT International. – 2011. – № 3. – P. 92–96.
3. Born C., Granderath R. Potential and difficulties of heat recovery in steel plants // MPT International. – 2013. – № 2. – P. 50–60.
4. Глинков М.А. Тепловая работа сталеплавильных ванн. – М.: Metallurgiya, 1970. – 408 с.
5. Марков Б.Л. Методы продувки мартеновской ванны. – М.: Metallurgiya, 1975. – 279 с.
6. Rummier K., Tunaboynu A., Ertas D. Scrap preheating and continuous charging system for EAF meltshops // MPT International. – 2011. – № 5. – P. 32–36.

*Поступила в редакцию 06.09.2013*

One be proposed to equip shaft furnace with continuous scrap melting in liquid metal by high-capacity gas-oxygen burner units. 125t fuel-arc steelmaking units have capacity of 240 t/hour and energy consumption of 200 kW hour/t under scrap heating up to 800 °C with gas flow rate of 15.5 m<sup>3</sup>/t and during blowing of bath by oxygen at border of slag-metal. Having environmental advantages, these units can successfully compete with best contemporary arc furnaces and alternate it.