

УДК 669.046

УЛУЧШЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕЧЕЙ И УСЛОВИЙ РАБОТЫ ФУТЕРОВКИ ПРИ РАЗВИТИИ МЕТОДОВ СТРУЙНО-ФАКЕЛЬНОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ НАГРЕВА МЕТАЛЛА

Представлены отечественные разработки метода струйно-факельного нагрева и развитие его модификаций за рубежом в виде DFI и Oxy-fuel отопительных систем. Рассмотрены преимущества указанных методов нагрева, в частности резкое уменьшение требуемого количества огнеупорных материалов и существенное улучшение условий эксплуатации футеровки печей. Представлены различные конструкции печей струйно-факельного нагрева и особенности их тепловой работы. Показано, что тепловой КПД современных печей со струйно-факельным отоплением может достигать 65 %, а эмиссия оксидов азота в них даже при подогреве воздуха до 650 °С не превышает 30 ppm. Оценена эффективность применения кислорода в нагревательных печах, отапливаемых природным газом, при различной стоимости последнего. Приведена зависимость расходов природного газа и кислорода, а также суммы расходов природный газ + кислород от степени обогащения воздуха для горения кислородом. Рассмотрены возможности экономически эффективного использования газокислородных горелок в плавильных печах.

Ключевые слова: нагревательные печи, струйно-факельный нагрев, DFI-технологии нагрева, Oxy-fuel отопительные системы, снижение температуры футеровки, экономия огнеупорных материалов, экономия топлива, повышение производительности, эмиссия оксидов азота, природный газ, кислород.

Метод струйно-факельного нагрева (СФН) листа и трубных заготовок в секционных печах, разработанный во Всесоюзном научно-исследовательском институте металлургической теплотехники (ВНИИМТ), впервые был внедрен на Северском трубном заводе, а затем (при участии сотрудников Уральского политехнического института под руководством В. Г. Лисиенко) на Первоуральском новотрубном заводе. Стендовые и опытно-промышленные исследования СФН с применением разработанных математических моделей начались в 1970-х годах, а промышленное вне-

дрение на заводах Урала осуществлялось начиная с 80-х годов прошлого века [1–3]. Активное участие в этих работах, кроме авторов настоящей статьи, принимали Ф. Р. Шкляр, Г. К. Маликов, Д. Л. Лобанов, В. А. Коршунов, Ю. К. Маликов, Ю. В. Крюченков и другие. Большую поддержку при промышленном внедрении СФН оказывали руководство и сотрудники Северского трубного и Первоуральского новотрубного заводов.

Основные особенности СФН демонстрируют его преимущества перед традиционными методами нагрева, в частности с использованием туннельных горелок, а также перед методами нагрева и термообработки металла в печах:

- горение струй предварительно подготовленной смеси организуется без использования горелочных туннелей и выносится в рабочий объем печи, при этом факел направляется непосредственно на поверхность нагреваемой заготовки (рис. 1);

- быстрый и равномерный нагрев заготовки (листа, трубы) достигается при размещении в кладке печи многосопловых неохлаждаемых горелок с калиброванными соплами, изготовленными из жаропрочной стали;

- большая скорость истечения смеси (100–300 м/с) исключает проскок пламени в горелку, предохраняет сопла от перегрева и обеспечивает

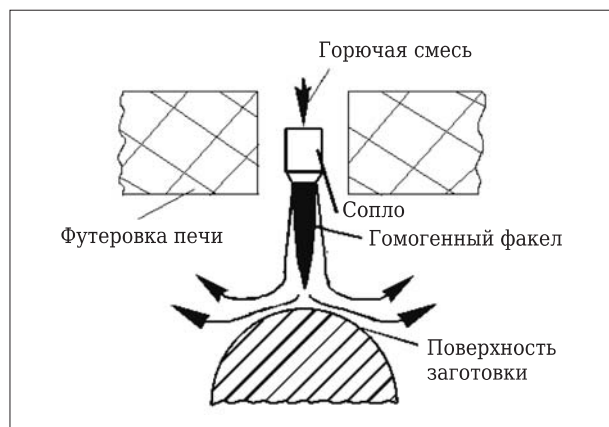


Рис. 1. Схема струйно-факельного нагрева (показано одно из сопел многосопловой горелки)

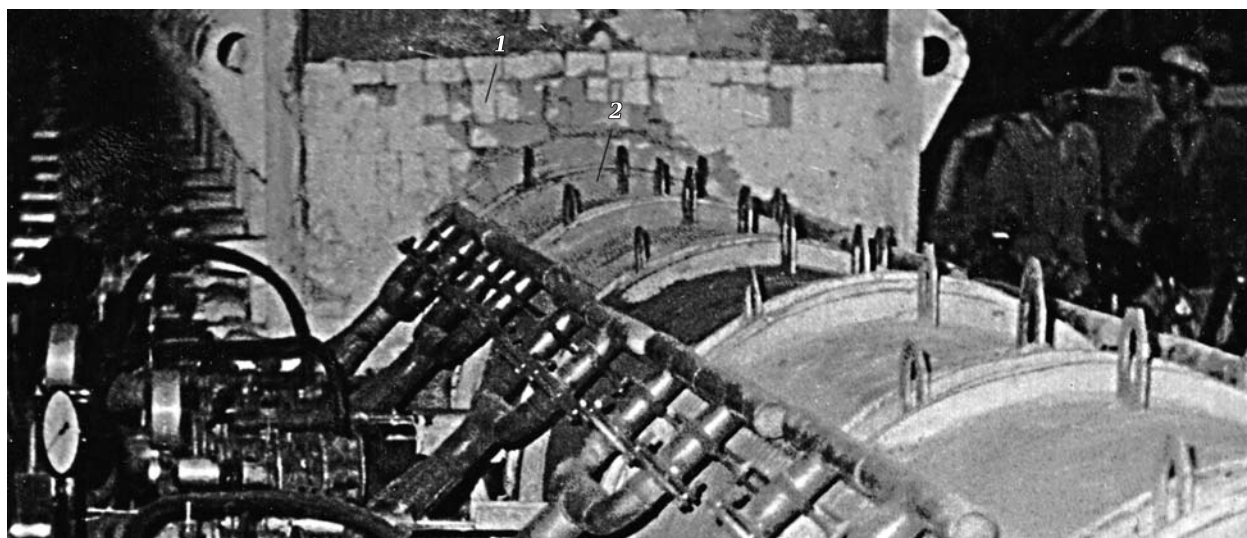


Рис. 2. Реконструкция одноручевой секционной печи: 1 — секция до реконструкции; 2 — секция СФН

коэффициент конвективной теплоотдачи у поверхности заготовок 150–250 Вт/(м²·К);

— простота конструкции дает возможность размещать достаточное для самых разнообразных условий нагрева число сопел на единицу поверхности металла (от 10 до 200 на 1 м²) и тем самым оптимизировать как тепловую эффективность схемы отопления, так и уровень экологической чистоты продуктов горения.

При этом печь получается компактной и малоинерционной, объем футеровки значительно сокращается (рис. 2), а условия ее эксплуатации существенно улучшаются.

Печи СФН при развитии от одноручевых секционных роликовых печей к трехручьевым печам [3–7] имели различные конструктивные модификации, представленные на рис. 3–6. В конструкции печи СФН, показанной на рис. 5, горелочные устройства одновременно выполняют рекупера-

цию теплоты (струйные рекуператоры непосредственно размещаются в корпусе горелки), обеспечивая при этом подогрев воздуха до 700 °С и дополнительное снижение расхода топлива.

Стендовые и промышленные испытания, а также результаты внедрения печей СФН позволили выявить их существенные преимущества по сравнению с ранее используемыми традиционными печами. Так, объем рабочего пространства одноручевой секционной печи СФН для нагрева непрерывной трубы (см. рис. 3) сократился в 5 раз, объем футеровки — почти в 4 раза, тепловой КПД увеличился в 2 раза, температура кладки, составлявшая до реконструкции около 1350 °С, снизилась на 200–250 °С. Это привело к значительному повышению стойкости футеровки и увеличению межремонтного периода, а также позволило обеспечить защиту металла от перегрева излучением от кладки печи в случае аварийных ситуаций.

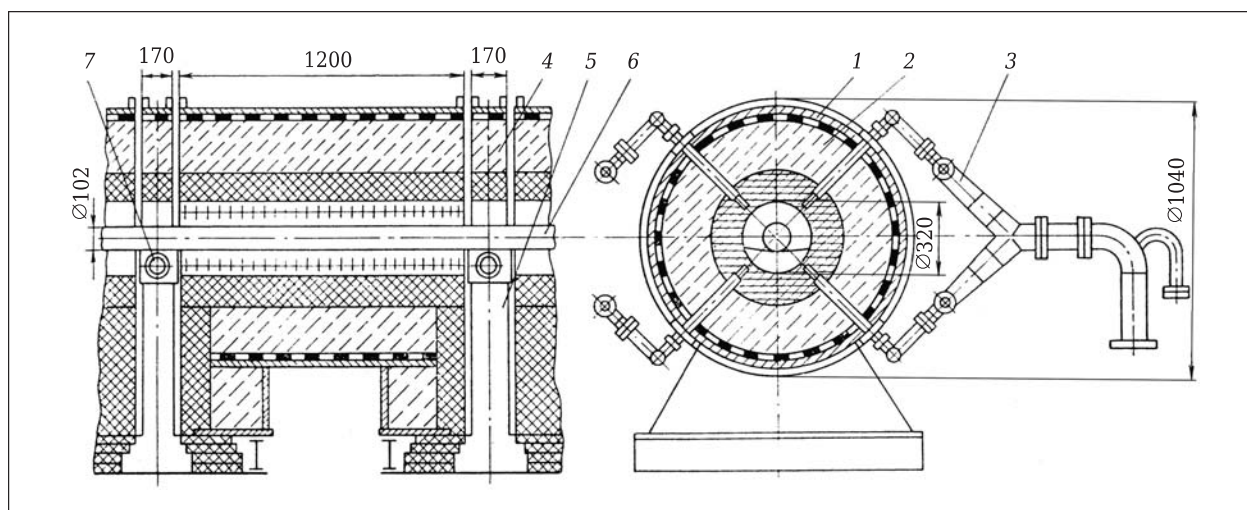


Рис. 3. Секция одноручевой печи СФН: 1 — корпус; 2 — кладка; 3 — многосопловая струйно-факельная горелка; 4 — крышка тамбура; 5 — дымоход; 6 — нагреваемая труба; 7 — транспортирующий ролик

В печи до реконструкции футеровка работала на пределе температур службы рядовых шамотных огнеупоров и нуждалась в частой замене. При аварийных остановках трубы в печи вследствие высокого потока излучения от разогретой кладки успевали прогнуться на роликах и даже оплавиться. Извлечение труб без их дожигания часто становилось невозможным. Дожигание труб в печи приводило к сильному разрушению футеровки. При СФН появилась возможность в случае аварийной ситуации легко и надежно обеспечить защиту металла от перегрева излучением от раскаленной кладки путем охлаждения заготовок струями воздуха.

Потери тепла на охлаждение роликов после реконструкции печи уменьшились в 1,7 раза, что объясняется более низкой температурой газов, кладки и меньшим коэффициентом облучения роликов. Печь СФН быстро разжигается и выходит на рабочий режим из холодного состояния за 1,3–2 ч в зависимости от допустимой скорости нагрева кладки. До реконструкции для достижения готовности печи требовалось значительное время из-за большого объема прогреваемой футеровки (от розжига до пуска трубы затрачивалось 6–8 ч). При переходе на рабочий режим в печи СФН практически сразу обеспечивается требуемый нагрев трубы. В режиме холостого хода после перехода на СФН стало возможным и достаточным поддерживать температуру кладки на уровне всего 950–1000 °С. В результате после реконструкции расход условного топлива снизился в 1,9–2,2 раза, производительность печи возросла на 15 %, ее КПД увеличился с 22 до 40–42 %.

На высокопроизводительных трехручьевых секционных печах СФН (рис. 4) для нагрева воздуха, идущего на горение, были применены выносные струйные трубчатые рекуператоры. При этом также достигается резкое сокращение габаритов печи, значительная экономия огнеупорных материалов, увеличение производительности печей, снижение удельных расходов топлива на 25–30 %.

Очень важно, что переход на СФН позволил резко (в 2–3 раза) сократить эмиссию оксидов азота. Учитывая, что при струйно-факельном отоплении происходит как резкое сокращение пребывания газов в зонах наиболее высоких температур, так и снижение уровня температур в целом, следует ожидать сравнительно низкого образования прежде всего термических оксидов азота (по известному механизму Я. Б. Зельдовича).

Более поздние исследования [8] показали, что в печах СФН одновременно реализуются несколько известных способов подавления эмиссии оксидов азота: снижение температуры горения (в ре-

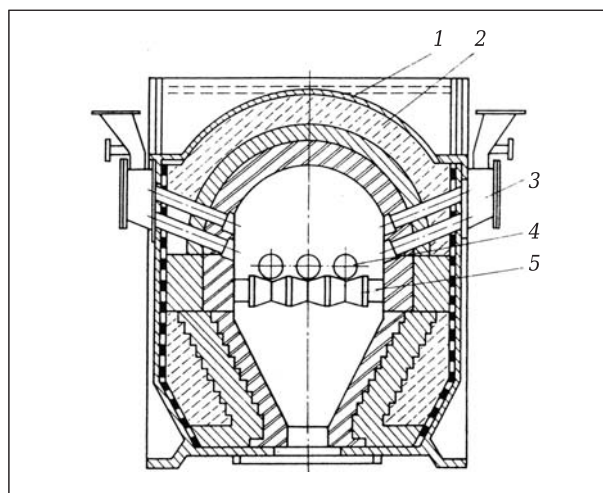


Рис. 4. Конструкция трехручьевой печи с боковым струйно-факельным отоплением многосопловой горелкой: 1 — каркас секции; 2 — кладка; 3 — многосопловая горелка; 4 — заготовка; 5 — транспортирующий ролик

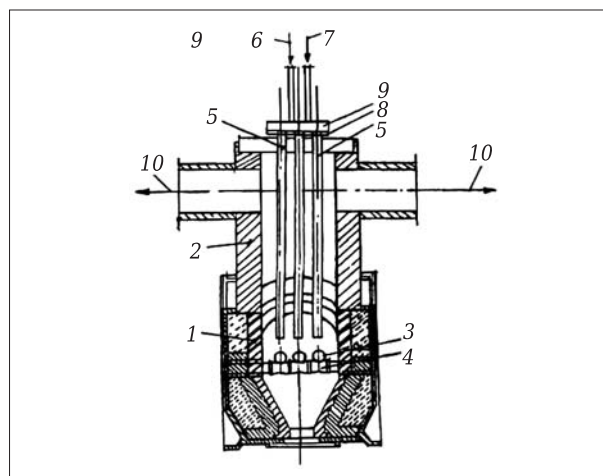


Рис. 5. Трехручьевая секционная печь СФН со струйно-рекуперативными горелками (СРГ): 1 — кладка; 2 — отводящий канал; 3 — трубные заготовки; 4 — ролик; 5 — корпус горелок СРГ; 6 — подача газа; 7 — подача воздуха; 8 — газовый коллектор; 9 — воздушный коллектор; 10 — отвод дымовых газов

зультате интенсивной теплоотдачи к нагреваемому металлу); увеличение кратности циркуляции (большое число струй и их высокая скорость); исключение локально перегретых зон газовой среды в рабочем объеме печи (вследствие предварительного перемешивания газа и воздуха и отсутствия горелочных камней). В системах СФН должен проявляться эффект от комбинированного воздействия этих способов. Выяснилось также, что в печах СФН оксиды азота образуются в основном по так называемому быстрому механизму, их эмиссия близка к минимально возможной и практически не зависит от температуры воздуха горения для исследованного диапазона подогрева воздуха 100–400 °С (рис. 7).

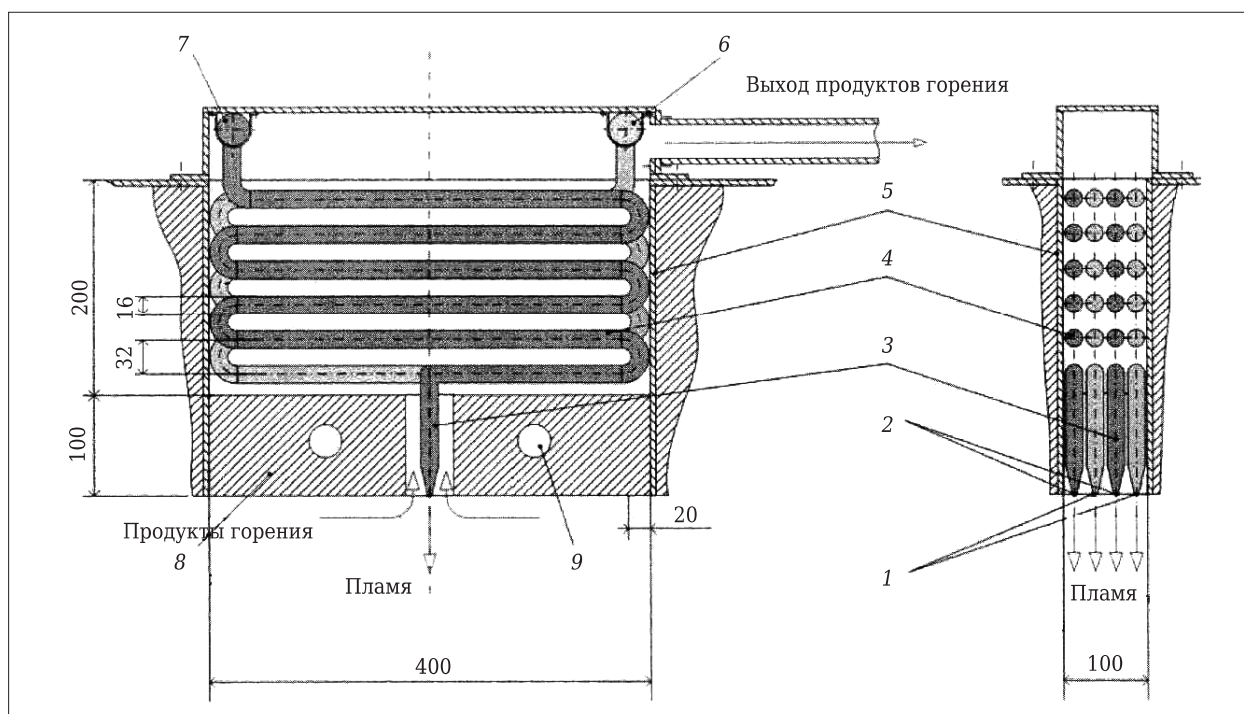


Рис. 6. Горелочно-рекуперативный блок: 1 — сопла для богатой газовой смеси; 2 — сопла для бедной газовой смеси; 3 — сопловая труба; 4 — петли рекуператора; 5 — камера рекуператора; 6 — коллектор богатой газовой смеси; 7 — коллектор бедной газовой смеси; 8 — горелочный камень; 9 — стальные поддерживающие стержни

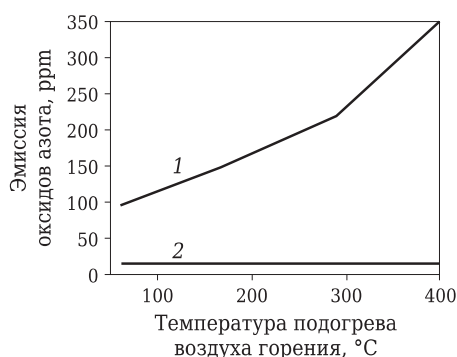


Рис. 7. Зависимость эмиссии NO_x от температуры подогрева воздуха: 1 — традиционные туннельные горелки, 2 — горелки СФН ($1 \text{ ppm} = 10^{-4} \%$)

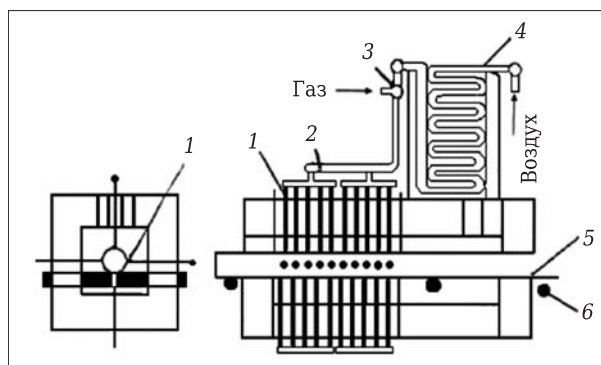


Рис. 8. Схема лабораторной печи струйно-факельного нагрева (DFI Lab Furnace): 1 — горелки полного смешения; 2 — коллектор; 3 — смеситель; 4 — рекуператор; 5 — водоохлаждаемый калориметр; 6 — ролики (исследовался также вариант плоской заготовки)

Детальное исследование особенностей тепловой работы печей СФН было предпринято совместно российскими и американскими специалистами на опытной лабораторной печи (рис. 8, 9). С американской стороны в исследованиях активное участие принимали Р. Висканта, М. Хинкис, Дж. Вагнер, И. Курек и др. Печь была установлена в опытном цехе Института технологий газа в Чикаго (США) и оборудована самыми современными, часто оригинальными, приборами для измерения расходов, температур, составов продуктов горения и др. Расход природного газа достигал $30 \text{ м}^3/\text{ч}$, температуру подогрева воздуха удалось поднять до 650°C . При работе на этой печи

удалось подтвердить ранее установленные и получить многие дополнительные данные о преимуществах СФН. В частности, тепловой КПД достигал 65 %, эмиссия оксидов азота даже при подогреве воздуха до 650°C не превышала 30 ppm против 240–250 ppm на обычных печах [4–5].

При подготовке и проведении экспериментов выполнялись 3D модельные исследования температурных, скоростных и концентрационных характеристик факелов и элементов рабочего пространства опытной печи, в основном подтвержденные экспериментальными данными (рис. 10, 11).



Рис. 9. «Комплексная бригада» российских и американских исследователей около опытной печи струйно-факельного отопления (США, Чикаго): первый справа В. Г. Лисиенко, третий — Г. К. Маликов

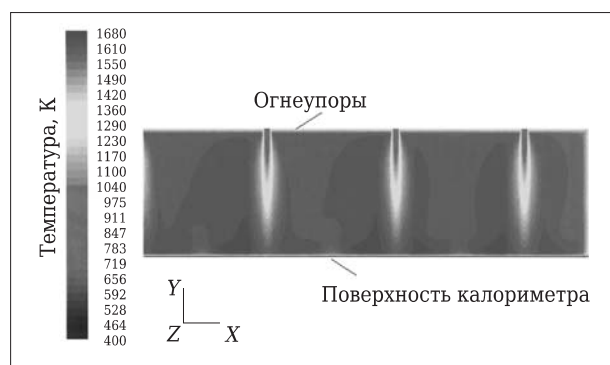


Рис. 10. Модельные температурные поля опытной печи СФН

При конструировании опытной печи и при проведении экспериментов в США при переводе обозначения способа СФН на английский язык по нашему предложению была использована аббревиатура DFI — Direct Flame Impingement метод нагрева [4]. Американские исследователи с этим согласились, и аббревиатура DFI стала считаться за рубежом общепринятой [5, 9]. Так, на рис. 12 представлена печь DFI на одном из американских заводов, предназначенная для нагрева больших алюминиевых заготовок, на рис. 13 — роликовая печь DFI (скоростного нагрева) на одном из заводов Германии.

Таким образом, развитие методов СФН привело к тому, что печи DFI конструировались и эксплуатировались в США, Германии, Швеции и дру-

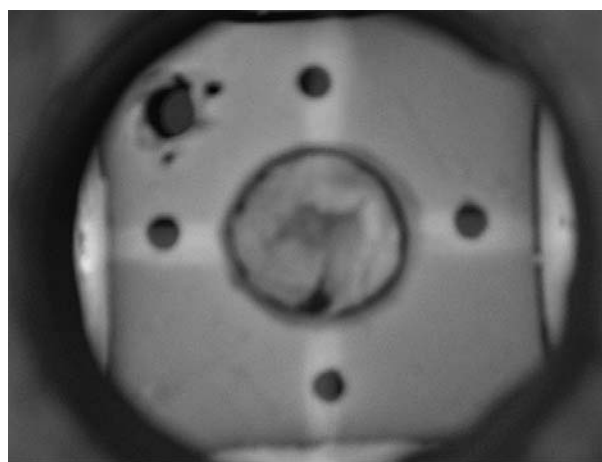


Рис. 11. Струйная зона лабораторной печи с четырьмя струйными факелами (фото с кобальтовым синим фильтром)

гих странах. Однако в ряде случаев особенностью этих печей (и это отмечалось в публикациях) было применение кислорода в горелочных устройствах. Поэтому к аббревиатуре DFI было добавлено Oxy-fuel.

Ряд обобщающих материалов, связанных с методом нагрева DFI Oxy-fuel, приведен в работах Института газа Национальной академии наук Украины [9, 10]. Отмечено, например, использование метода DFI Oxy-fuel (направление пламени непосредственно на металл) в термических печах, на установках для нагрева стальной полосы (Германия, Швеция, Южная Корея, общие немец-

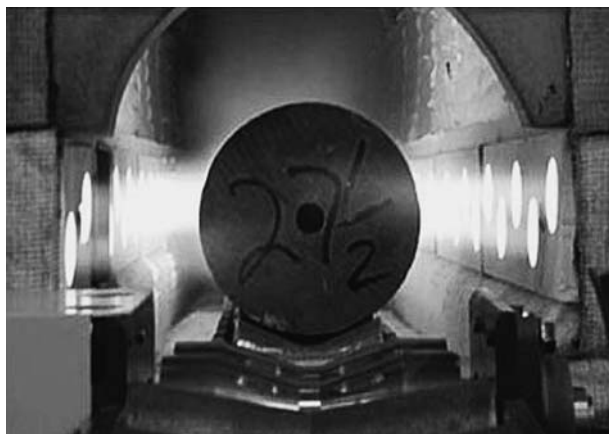


Рис. 12. Печь DFI для нагрева алюминиевых биллетов под экструзию (США)

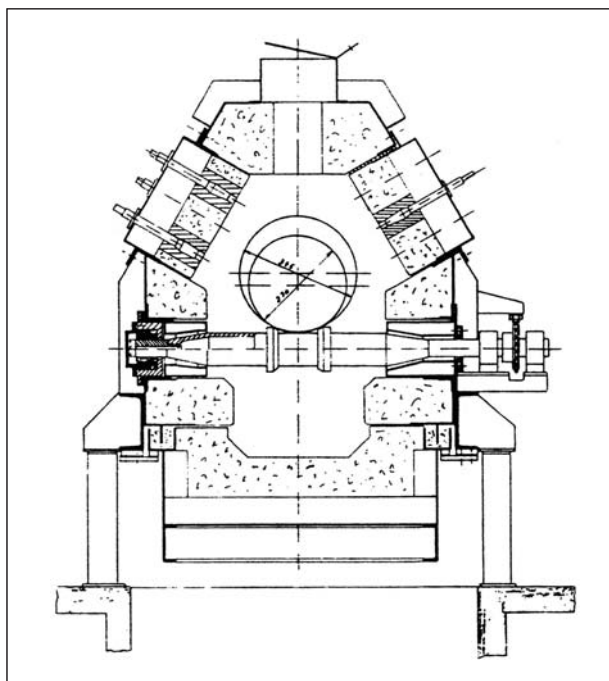


Рис. 13. Роликовая печь DFI скоростного нагрева заготовок из цветных металлов (ФРГ)

ко-шведские разработки фирмы «Linde Group» [9, 10].

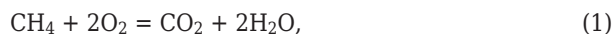
При этом подчеркивается, что применение кислорода в печах DFI Oxy-fuel позволяет значительно увеличить производительность и снизить расход топлива. Отметим, что использование кислорода за рубежом как в стекловаренных печах, так и при нагреве в различных агрегатах получило заметное распространение. Сообщается об использовании кислорода в кольцевых и методических печах с обогащением воздуха от 5 до 100 %. Так, по опыту компании «Linde Group», применение кислорода в нагревательных печах привело к снижению удельного расхода топлива на 63 % и

эмиссии вредных веществ с уходящими газами на 74 %, а также к уменьшению времени нагрева в 1,7–2,0 раза. Сообщается также об уменьшении образования окалины (на 76 %), уменьшении габаритов горелочных устройств и всей печи, снижении уровня шума, температуры наружного кожуха печи, износа огнеупоров и объема ремонтных работ при сроках окупаемости до двух лет [9, 10].

Однако в нашей стране применение кислорода пока ограничивается в основном высокотемпературными плавильными печами [11, 12].

С нашей точки зрения, целесообразно проанализировать экономическую эффективность использования кислорода в плавильных и нагревательных печах в различных условиях, связанных с ценами электроэнергии, природного газа и кислорода. Как известно, в России по настоящее время действуют дотационные цены на природный газ, хотя они в последнее время постепенно повышались с почти 20 до 110 долл. США (3300 руб.) за 1000 м³. При этом стоимость 1000 м³ кислорода можно принять на уровне 120 долл. США (3600 руб.), стоимость 1 кВт·ч электроэнергии — 2,7–3,0 руб. За рубежом цена природного газа может достигать 350 долл. США за 1000 м³, иногда даже выше. Так, на Украине стоимость природного газа достигает 600 долл. США, кислорода 150 долл. США за 1000 м³ [10].

Эффективность применения кислорода в процессах нагрева при различной стоимости природного газа оценим предварительно в рафинированном виде, не учитывая другие факторы, связанные с применением кислорода. Применительно в основном к нагревательным устройствам экономические особенности обогащения воздуха кислородом можно достаточно наглядно представить по зависимости расходов природного газа и кислорода, а также по сумме расходов природный газ + кислород от степени обогащения воздуха для горения кислородом (рис. 14). При оценке соотношения газ – кислород, естественно, исходили из стехиометрической реакции



из которой следует, что при горении одного объема природного газа требуются два объема кислорода. Расчеты проведены для условного расхода природного газа 1000 м³/ч (довольно реального для ряда нагревательных печей и установок).

Для российских условий цена природного газа была принята 110 долл. США (3300 руб.), а для зарубежных — 350 долл. США (10500 руб.) за

1000 м³ газа. Цену кислорода приняли одинаковой — 120 долл. США (3600 руб.) за 1000 м³.

По данным ряда зарубежных источников, детально проанализированных в статье [9], тепловой КПД нагревательных печей, работающих при нагреве методом Оху-fuel, с увеличением обогащения воздуха для горения кислородом может увеличиваться до двух раз, что и принято в нашем расчете.

Как следует из рис. 14, при сравнительно малой (российской) цене природного газа при обогащении воздуха кислородом наблюдается значительный рост затрат — более чем в 1,5 раза (линия 4). В то же время в случае повышенной цены природного газа при обогащении воздуха кислородом наблюдается, наоборот, снижение затрат на природный газ + кислород, правда, не такое значительное, в нашем случае на 20 %.

Конечно, в этом расчете не учтен такой важный фактор, как увеличение производительности (по обзору [10] — на 30–100 % при нагреве методом Оху-fuel), что обеспечивает существенные аргументы в пользу обогащения воздуха кислородом при нагреве. К этому можно добавить дополнительные возможности снижения габаритов печей, экономии огнеупоров и металла при сооружении трубопроводов и устройств для нагрева окислителя (рекуператор, регенератор). По-видимому, в российских условиях при существующей цене природного газа качественного изменения обстановки, представленной на рис. 14, вряд ли можно пока ожидать, особенно с учетом необходимости значительных концентрированных капитальных затрат на сооружение кислородных станций. Вероятно, в российских условиях использование кислорода в нагревательных печах может стать экономически эффективным при цене природного газа, превышающей 200–220 долл. США за 1000 м³.

Совсем другое положение при рассмотрении теплотехнических особенностей плавильных агрегатов. В этом случае, например применительно к дуговым печам и подаче природного газа через газокислородные горелки в объеме 30 м³/ч, эквивалентное по теплу количество электроэнергии составит 296,8 кВт. Тогда при ценах кислорода 3600 руб. за 1000 м³ и природного газа 3300 руб. за 1000 м³ (110 долл. США) эквивалентная цена замещенной электроэнергии (2,9 руб. за 1 кВт·ч) в 2,54 раза больше. При цене природного газа 10500 руб. за 1000 м³ (350 долл. США) эта разница составит меньшую, но все равно внушительную величину (в 1,51 раза).

Имеется еще одно крайне важное обстоятельство, отличающее высокотемпературные пла-

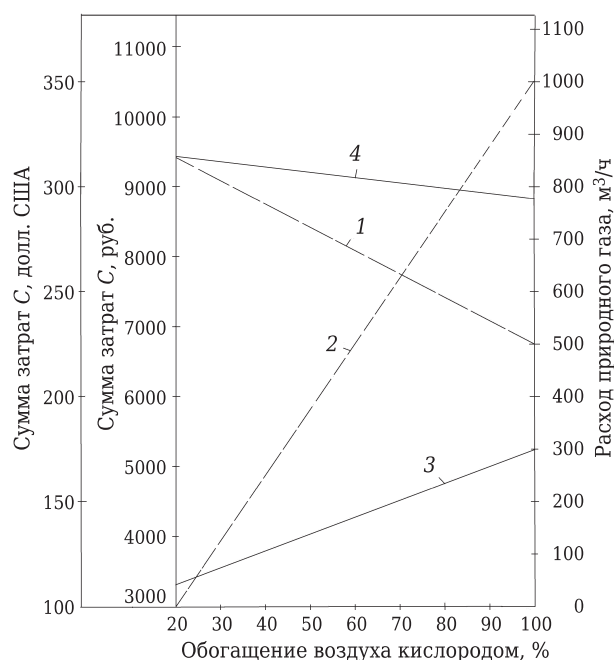


Рис. 14. Зависимость расходов природного газа G (1) и кислорода (2), а также суммы затрат C природный газ + кислород при цене природного газа 3300 руб., или 110 долл. США (3), и 10500 руб., или 350 долл. США (4). Расчет на расход природного газа при работе печи на воздухе и $G = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ и при росте теплового КПД в два раза при увеличении обогащения воздуха кислородом с 21 до 100 %

вильные печи. Теплообменный КПД печей $\eta_{\text{п}}$ равен [13]:

$$\eta_{\text{п}} = \theta_{\text{и}} \eta_{\text{и}}, \quad (2)$$

где $\theta_{\text{и}}$ — фактор начального подогрева; $\eta_{\text{и}}$ — прямой теплообменный КПД.

Величина

$$\theta_{\text{и}} = \frac{T'_2 - T'_1}{T'_2 - T_0}, \quad (3)$$

где T'_2 — температура газов на входе в рабочее пространство; T'_1 — температура (начальная) нагреваемого или расплавляемого материала; T_0 — температура окружающей среды.

С учетом более высокой величины T'_1 для плавильных агрегатов по сравнению со значением для нагревательных печей из формул (2) и (3) следует, что теплообменный КПД плавильных агрегатов при одной и той же величине $\eta_{\text{и}}$ будет заведомо меньше.

В сталеплавильных ваннах, например, эта величина $T'_1 \approx 1500 \div 1600 \text{ }^\circ\text{C}$ и при температуре $T'_2 = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$ значение

$$\theta_{\text{и}} = \frac{2000 - 1600}{2000 - 20} = 0,202,$$

т. е. при росте температуры металла на такую величину снижается прямой теплообменный КПД

η , который также, как правило, существенно меньше единицы.

Таким образом, для увеличения теплообменного, а следовательно, и теплового КПД необходимо всемерное увеличение прямого теплообменного КПД. Это становится возможным при повышении температуры теплоотдающей среды T'_2 , что и обеспечивается при использовании газокислородных горелок в плавильных печах и делает их использование в этом топливно-кислородном контексте экономически эффективным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При отечественном приоритете разработки и внедрения эффективного способа струйно-факельного отопления этот способ (DFI) уже получил распространение за рубежом. Способ обеспечивает снижение габаритов печей и установок, существенную экономию огнеупорных материалов, снижение расходов топлива и эмиссии оксидов азота, увеличение производительности печей.

В зарубежных странах в последнее время в процессах нагрева металла достаточно широко используется кислород, в результате чего, вероятно, DFI-метод получил аббревиатуру DFI Oxy-fuel.

Представлена роль цены природного газа в оценке эффективности использования кислорода в нагревательных печах: при относительно низкой цене газа применение кислорода в системе топливо – кислород проявляет негативную тенденцию.

В плавильных дуговых печах замена части электроэнергии природным газом, сжигаемым в кислороде, является экономически выгодной при рассмотренных относительно как низкой, так и высокой цене природного газа.

Библиографический список

1. А. с. 726400 СССР. Проходная печь для скоростного нагрева металла / Г. К. Маликов, Ф. Р. Шкляр, Д. Л. Лобанов и др. ; заявл. 01.06.77 ; опубл. 05.04.1980.
2. Маликов, Г. К. Эксплуатация печи струйного нагрева в линии трубоэлектросварочного стана / Г. К. Маликов, Ф. Р. Шкляр, В. А. Коршунов [и др.] // Сталь. — 1983. — № 7. — С. 80–82.
3. Лисиенко, В. Г. Эффективность применения струйно-факельного нагрева в промышленных печах / В. Г. Лисиенко, Г. К. Маликов, Ю. К. Маликов [и др.] // Сталь. — 1996. — № 6. — С. 45–48.

4. Lissijenko, W. G. Verallgemeinerung der Erfahrungen bei dem Einsatz der Direkt-Flammen-Erwarung von Metall in Industrieofen / W. G. Lissijenko, S. N. Guschtschin, G. K. Malikow [et al.] // Gaswarne International. — 2001. — Bd 50, № 5/6. — S. 229–235.

5. Malikov, G. K. Mathematical modeling of direct flame impingement heat transfer / G. K. Malikov, V. G. Lisienko, Yu. K. Malikov [et al.] // Proceedings of IMECE 2006. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Chicago, IL, USA. — IMECE, 2006. — 13472.

6. Лисиенко, В. Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование : справочное изд. в 3 кн. Кн. 2 / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев ; под ред. В. Г. Лисиенко. — М. : Теплотехник, 2004. — 832 с.

7. Лисиенко, В. Г. Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств (интегрированный энерго-экологический анализ: теория и практика). В 2 т. Т. 1 / В. Г. Лисиенко. — М. : Теплотехник, 2010. — 688 с.

8. Маликов, Г. К. Расчет эмиссии оксидов азота при сжигании природного газа в промышленных горелочных устройствах / Г. К. Маликов, В. Г. Лисиенко, К. Ю. Маликов [и др.] // Сталь. — 2002. — № 2. — С. 91–96.

9. Сорока, Б. С. Системы сжигания и теплоутилизационные устройства технологических печей: современное состояние и мировые тенденции развития / Б. С. Сорока // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2012. — № 2. — С. 54–68.

10. Карп, И. Н. Использование кислорода и обогащенного воздухом кислорода в нагревательных печах, коллодах, стендах разогрева сталеразливочных ковшей / И. Н. Карп, А. Н. Зайвый, Е. П. Марцевой [и др.] // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2012. — № 3. — С. 18–28.

11. Гречко, А. В. О применении природного газа и кислорода в пирометаллургии и энергетике / А. В. Гречко // Промышленная энергетика. — 2003. — № 11. — С. 41–48.

12. Савин, А. В. Интенсификация плавки в дуговых сталеплавильных печах / А. В. Савин, В. Е. Никольский, Д. В. Вохнинцев // Главный энергетик. — 2012. — № 7. — С. 45–48.

13. Лисиенко, В. Г. Хрестоматия энергосбережения : справочное изд. в 2 кн. Кн. 1 / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев ; под ред. В. Г. Лисиенко. — М. : Теплотехник, 2002. — 688 с. ■

Получено 05.12.12

© В. Г. Лисиенко, Е. М. Шлеймович, 2013 г.