

**А. В. Сущенко, А. С. Безчерев\*, В. Л. Прахнин\* И. Н. Фентисов\*, О. А. Гавриков\*,  
А. К. Харин\*, Н. Л. Стариковский\***

Приазовский государственный технический университет, Мариуполь

\*ПАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича», Группа Метинвест

## **Совершенствование системы отопления мартеновских печей в ПАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича»\*\***

*Разработаны и внедрены на 650- и 900-тонных мартеновских печах ПАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича» новые: конструкция газомазутной горелки, система подачи и регулирования расхода природного газа на печь, а также режимы ее отопления, позволившие улучшить организацию газомазутного факела и управление теплотехнологией мартеновской плавки, получить экономию топлива (мазут + природный газ) и сжатого воздуха.*

**Ключевые слова:** энергосбережение, мартеновская печь, система отопления, газомазутная горелка, природный газ, мазут

**Ч**ерная металлургия Украины по такому важнейшему показателю, как сквозная энергоемкость продукции, значительно отстает от зарубежных стран, что связано с использованием устаревшего и изношенного оборудования, а также со слабым применением современных энергоресурсосберегающих технологий [1 и др.]. По отчетным данным ПХО «Металлургпром», за I полугодие 2011 г. около 30 % стали в стране производится в мартеновских печах, которые считаются неэффективными (в тепловом отношении) и являются одними из основных загрязнителей окружающей среды. Вместе с тем, по мнению экспертов, в связи с недостатком на металлургических предприятиях финансовых средств для замены мартеновского производства конвертерным или электросталеплавильным полное закрытие мартеновских цехов в настоящее время проблематично. В ближайшие годы мартеновский процесс будет оставаться одним из основных способов выплавки стали. Поэтому вопросы совершенствования тепловой работы мартеновских печей с целью сокращения удельного расхода топлива и энергоносителей на выплавку стали, а также снижения вредных выбросов в окружающую среду (на базе беззатратных и малозатратных мер) весьма актуальны. Настоящая работа посвящена решению указанных вопросов на Мариупольском металлургическом комбинате им. Ильича (ММК им. Ильича), где мартеновский цех занимает четвертое место по потреблению ТЭР и третье – по количеству вредных выбросов.

Одним из наиболее эффективных энергоресурсосберегающих направлений, позволяющих без значительных временных и финансовых затрат существенно улучшить целый ряд технико-экономических показателей работы мартеновских печей (КПД, КИТ, удельные расходы топлива и других энергоносителей на выплавку стали, производительность агрегатов, вредные выбросы в окружающую среду) является совершен-

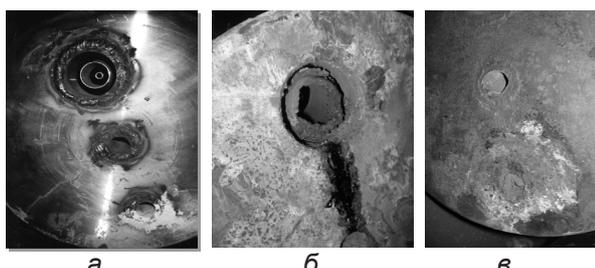
ствование системы их отопления, в т. ч. конструкции сожигательных устройств и режимов подачи энергоносителей в рабочее пространство агрегата [2-5].

На ММК им. Ильича, входящем в Группу Метинвест, для отопления 650- и 900-тонных мартеновских печей (МП) использовались газомазутные горелки (ГМГ) с двухступенчатым распыливанием мазута предварительно подогретым (до 60-70 °С) компрессорным воздухом (первая ступень распыливания) и природным газом высокого давления (вторая ступень). В результате комплексного анализа основных параметров, условий и показателей работы системы отопления печей с ГМГ базовой конструкции были выявлены следующие ее недостатки. В связи с относительно низким ( $\leq 0,4$  МПа) давлением сжатого воздуха в цеховой магистрали имеют место ограниченные возможности по совершенствованию организации и управлению параметрами факела в печи. Использование сжатого воздуха в качестве первичного распылителя мазута ухудшает тепловой баланс факела и плавки в целом (из-за относительно низкой по отношению к проходящему через регенератор вентиляторному воздуху температуры и наличия балластной составляющей – азота), а также дополнительно уменьшает дальнобойность факела вследствие подачи внутрь его окислителя. Положение усугубляет также повышенная влажность сжатого воздуха, особенно в осенне-зимний период.

С другой стороны, применяемый для отопления МП природный газ (ПГ) имеет более высокое и стабильное давление (0,6-0,7 МПа) по сравнению со сжатым воздухом. Однако при его подаче только во вторую ступень распыливания ГМГ потенциальная энергия ПГ неэффективно используется для распыливания мазута и организации факела. Так, по данным натурных замеров, давление природного газа перед горелками базовой конструкции в процессе их эксплуатации составляет 0,22-0,35 МПа.

\*\*В работе принимали участие: Е. Н. Лещенко, А. П. Балаба, А. А. Годынский, С. М. Комар, В. Ф. Лысенко, С. В. Трибрат, О. С. Пухальский, В. Б. Кудряшов, А. В. Подлесный, Д. Н. Шмельков, А. В. Гайдуков, В. М. Горевой, Н. С. Редя, А. А. Малюк, Н. И. Горлач, Ю. Г. Сергиенко, В. А. Бочарова

Подачу интенсификатора (кислорода) в ГМГ базовой конструкции осуществляют по двум каналам, расположенным в вертикальной плоскости под газомазутным сопловым модулем (рис. 1, а), что позво-

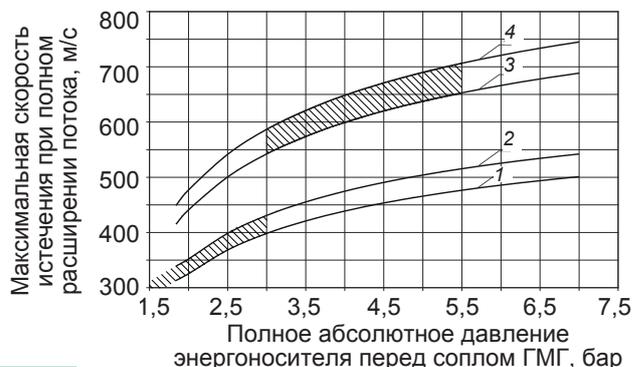


**Рис. 1.** Газомазутная горелка базовой конструкции: а – после изготовления (вид спереди); б, в – после эксплуатации на МП (б – затекание мазута в верхнее кислородное сопло, в – забитое нижнее кислородное сопло)

ляет при необходимости эффективно перераспределять поток кислорода через ГМГ между газомазутным факелом и ванной. Однако у такого варианта есть недостатки. Так, при периодической выдувке остаточного мазута из горелки (особенно при использовании для очистки каналов ГМГ водяного пара) часть мазута попадает в кислородные сопла, что небезопасно, а также приводит к настылеобразованию на выходных участках сопел и, как следствие, нарушению организации факела (рис. 1 б, в). В случаях повышенной тепловой нагрузки (за счет увеличенного расхода мазута) подача части кислорода через нижний канал может не обеспечить полное сжигание мазута в факеле. Кроме того, при существующей классической схеме подачи интенсификатора горения в рабочее пространство печи с двух противоположных сторон поочередно (в режиме реверсирования факела) в удаленной от подающей головки части рабочего пространства печи в газовой фазе над ванной имеют место низкое содержание кислорода и повышенное содержание монооксида углерода; отключенные кислородные сопла ГМГ подвергаются интенсивному воздействию газопылевого потока из рабочего пространства печи и периодически забиваются. Это приводит к усилению недожога топлива и отходящих газов, особенно при повышенных тепловых нагрузках и интенсивном окислении углерода расплава, а также к необходимости проведения трудоемких операций по очистке сопел.

На основе сравнительного анализа потенциальных возможностей различных вариантов использования имеющихся в цехе энергоносителей (сжатый воздух, азот, водяной пар, природный газ) в качестве распылителей мазута было принято решение о разработке газомазутной горелки новой конструкции с двухступенчатым распыливанием мазута природным газом. На рис. 2 в качестве примера представлены зависимости максимально возможной скорости истечения газообразных распылителей мазута (природного газа и сжатого воздуха) от их давления и температуры (перед соплом).

Для эффективной работы горелки разработали и внедрили новую систему подачи и регулирования расхода природного газа и других энергоносителей на МП, обеспечивающую минимальные потери давления и независимое регулирование расходов ПГ по



**Рис. 2.** Изменение максимальной скорости истечения сжатого воздуха и природного газа в зависимости от давления и температуры: 1, 2 – сжатый воздух при 20 и 70 °С соответственно; 3, 4 – природный газ при 20 и 70 °С соответственно; заштрихованная область соответствует реальному располагаемому давлению энергоносителя в мартеновском цехе

обеим ступеням распыливания ГМГ. Это позволило расширить возможности регулирования параметров факела и более полно использовать потенциальную энергию давления природного газа (для улучшения кинетических характеристик факела) в условиях постоянного изменения его расхода на печь (в соответствии с теплотехнологическими задачами плавки).

С целью обеспечения оптимальной организации газомазутного факела в рабочем пространстве печи и необходимого качества распыливания мазута, а также повышения эффективности сжигания топлива был разработан новый способ отопления МП, основанный на оптимизации распределения расхода ПГ по ступеням распыливания при изменении его давления перед горелкой [6]. Установлено, что оптимальная доля расхода природного газа  $q_1$ , используемого в качестве первичного распылителя мазута, от общего его расхода на горелку составляет: **15-45 % при абсолютном давлении природного газа перед горелкой  $P_f = (0,80 \dots 1,20) \times P_{f,ном}$ ; 30-70 % – при  $P_f = (0,60 \dots 0,79) \times P_{f,ном}$ ; 50-100 % – при  $P_f = (0,40 \dots 0,59) \times P_{f,ном}$** , где  $P_{f,ном}$  – номинальное абсолютное давление ПГ перед горелкой.

При недостаточной величине  $q_1$  (для соответствующих диапазонов  $P_f$ ) распыливание мазута неудовлетворительное, что приводит к существенному ухудшению качества сжигания топлива (химическому недожогу), снижению температуры факела, чрезмерному его удлинению и смещению зоны расположения корневой области ближе к концу печи. Ухудшаются показатели использования топлива в рабочем пространстве агрегата в целом. При чрезмерно высоком значении параметра  $q_1$  происходит «перераспыл» мазута, что заметно уменьшает дальность факела. Кроме того, в этом случае величина проходного сечения газового сопла второй ступени распыливания ГМГ является достаточно малой, и пределы регулирования горелки сужаются.

С целью максимально возможного использования потенциальной энергии давления ПГ для распыливания мазута, повышения кинетической энергии и расширения возможностей регулирования параметров факела при проектировании ГМГ была использована разработанная и опробованная ранее [7, 8] конструкция соплового модуля первой ступени распыливания горелки. Она основана на оптимизации

формы и конструктивных размеров сопел, а также основного рабочего положения выходного сечения конического сужающегося мазутного сопла относительно минимального сечения газового конического сопла Лавалья –  $I_x$ . При  $I_x = (-0,2...+0,6) \times d_e^{\min}$  (где  $d_e^{\min}$  – эквивалентный диаметр минимального сечения сопла Лавалья для подачи первичного распылителя, с учетом частичного перекрытия его мазутным соплом) обеспечиваются одновременно достаточно высокие степень распыливания мазута, дальнобойность и «жесткость» газомазутного факела, а также близкое к оптимальному его температурное поле и хорошая настильность. Режим истечения энергоносителей стабильный, явление «запирания» мазутного потока отсутствует.

В ГМГ новой конструкции, в отличие от базовой, подача интенсификатора осуществляется по двум независимо регулируемым каналам, расположенным в горизонтальной плоскости под газомазутным сопловым модулем на определенном расстоянии от его оси [9] (рис. 3). Это позволяет увеличить окисли-

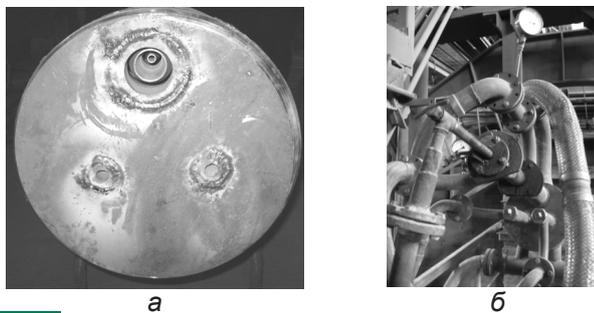


Рис. 3. ГМГ новой конструкции: вид спереди после изготовления (а); задняя часть в процессе опытно-промышленных испытаний на МП № 3 (б)

тельный потенциал факела и обеспечить более полное сжигание мазута, в том числе при высоких его расходах, что особенно важно, учитывая вывод из горелки части окислителя в виде сжатого воздуха. При необходимости можно легко обеспечить интенсификацию подачи кислорода в ванну, увеличив расход кислорода через сводовые фурмы.

Разработан энергосберегающий способ отопления мартеновских печей [10], основанный на организации дополнительной подачи части интенсификатора горения в рабочее пространство печи со стороны, противоположной газомазутному факелу, и позволяющий повысить эффективность использования топлива и химического потенциала отходящих из сталеплавильной ванны газов, снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций, связанных с «хлопками» монооксида углерода в газоотводящем тракте печи, а также улучшить условия эксплуатации кислородных сопловых аппаратов ГМГ.

При проектировании ГМГ новой конструкции, с учетом реальных условий снабжения мартеновского цеха природным газом, расчетное значение полного давления ПГ непосредственно перед ГМГ было принято равным 0,45 МПа. При этом максимальный расход ПГ через горелку составил 6500 м<sup>3</sup>/ч; основной рабочий диапазон расходов ПГ – (3000±6000) м<sup>3</sup>/ч (при работе в режиме «дежурного газа» – 2000 м<sup>3</sup>/ч); максимальный расход мазута – 3000 кг/ч.

Для защиты газомазутного соплового модуля отключенной в период реверсирования факела горелки от встречного газопылевого потока было предложено организовать подачу сжатого азота через газовое сопло первой ступени распыливания горелки, а в качестве резервного защитного газа использовать водяной пар. При этом расход защитного газа составляет 300-500 м<sup>3</sup>/ч.

Опытно-промышленные испытания первой, пилотной партии из двух газомазутных горелок новой конструкции были проведены на 650-тонной мартеновской печи № 3 в феврале 2008 г. Горелки были установлены на печь после «холодного» ремонта и эксплуатировались непрерывно 162 плавки – до малого «холодного» ремонта, после которого их заменили аналогичными горелками новой конструкции. Этот вариант ГМГ используется на МП № 3 непрерывно по настоящее время.

Так как первая ступень ГМГ играет главную роль при распыливание мазута, в процессе плавки расход ПГ через указанную ступень поддерживали относительно постоянным, а суммарный расход ПГ через ГМГ регулировали посредством второй ступени распыливания горелки. В зависимости от давления природного газа в цехе оптимальный его расход через первую ступень распыливания ГМГ новой конструкции ( $V_{ПГ,1}$ ) составил 2000-2500 м<sup>3</sup>/ч. Увеличение  $V_{ПГ,1}$  до 2500 м<sup>3</sup>/ч (при сохранении постоянного общего расхода ПГ на горелку) позволяет дополнительно повысить кинетическую энергию и «жесткость» факела, а также улучшить распыливание мазута. Однако при этом несколько снижается длина светящейся части факела. Большее увеличение  $V_{ПГ,1}$  нецелесообразно из-за «перераспыла» мазута при низких его расходах и неудобства в регулировании общего расхода ПГ на ГМГ.

Установлено, что при расходе мазута до 2000 кг/ч достаточно высокая степень его распыливания может быть обеспечена при работе даже одной (первой) ступени ГМГ. При больших расходах мазута требуется эффективная работа обеих ступеней распыливания.

При использовании опытных ГМГ (в отличие от базовых) приемлемая степень распыливания мазута при его номинальных расходах наблюдалась даже без подачи кислорода в факел, то есть только за счет природного газа. Об увеличении полноты сжигания мазута в рабочем пространстве агрегата свидетельствовало также состояние верхней части насадок регенераторов во время их обследования на малом «холодном» ремонте печи после проведения опытно-промышленных испытаний горелок.

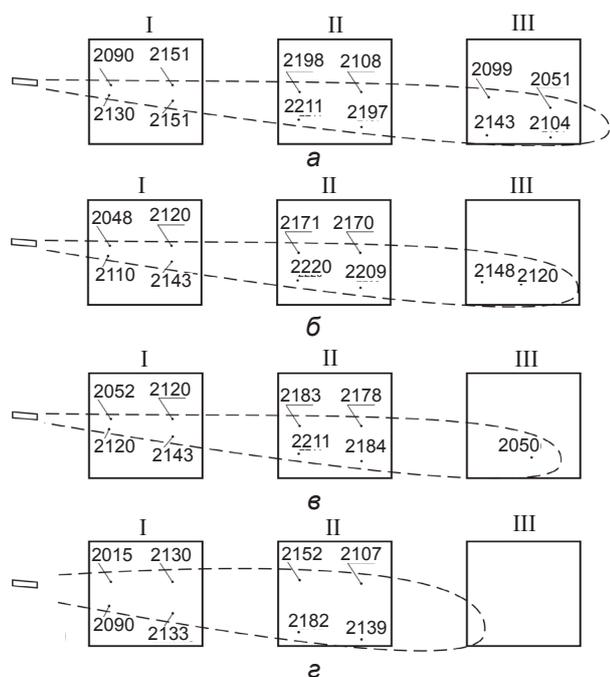
Анализ параметров газомазутных факелов, полученных при использовании горелок новой и базовой (с первоначальным распыливанием мазута сжатым воздухом) конструкций при аналогичных параметрах подаваемых энергоносителей показал, что применение новых горелок позволяет заметно улучшить организацию факела, в частности: удлинить его (на одну крышку завалочного окна, то есть на ≈2 м), температуру в нижней части факела повысить (на 20-50 °С), а в верхней – понизить (на 10-30 °С) и увеличить зону подготовки факела (до перевала печи).

На рис. 4 в качестве примера представлены результаты исследований параметров факелов, проведенных на МП № 3 с использованием горелок новой конструкции при давлении ПГ на вводе в печь 0,62-0,63 МПа.

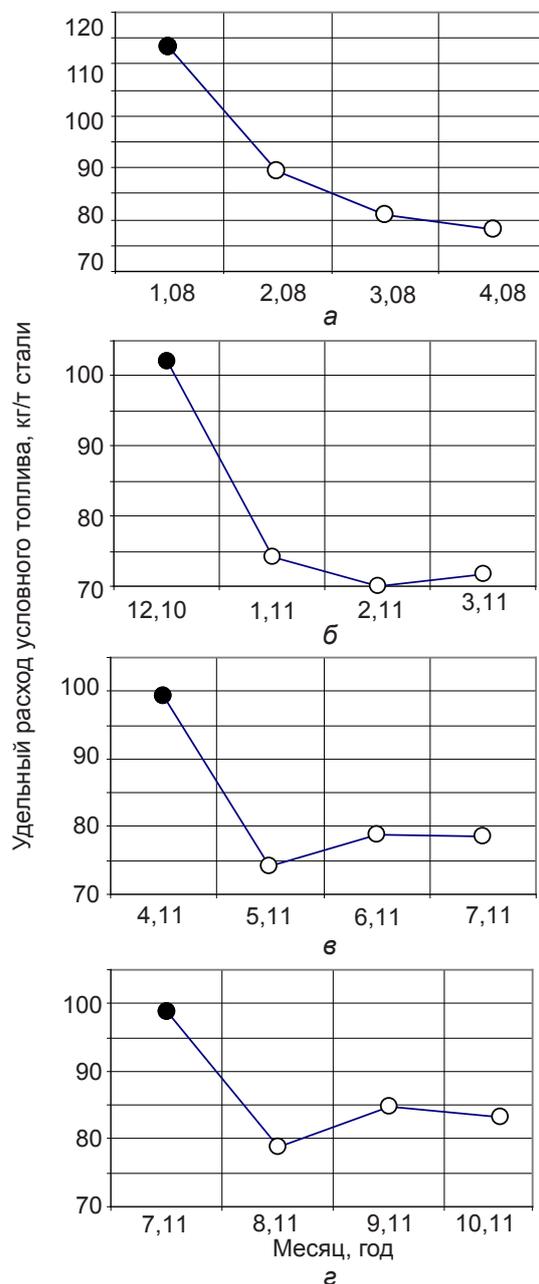
Получено также увеличение нагревательной способности печи, в том числе при использовании горячебрикетированного железа в шихте плавок (при прочих равных условиях период плавления сократился на  $\approx 17\%$ ), что объясняется увеличением светимости, температуры и площади излучающей поверхности факела.

Широкомасштабное внедрение разработки в мартеновском цехе ММК им. Ильича было осуществлено с января по август 2011 г. на всех остальных (трех 900-тонных) печах после проведения в процессе их «холодных» ремонтов модернизации системы подачи и регулирования расходов ПГ. Стоимость такой модернизации составила в среднем 33 тыс. грн. на одну печь. На рис. 5 представлена динамика изменения удельного расхода условного топлива (мазут + природный газ) на выплавку мартеновской стали по печам в первые три месяца после внедрения газомазутной горелки новой конструкции.

Для проведения сравнительного анализа эффективности тепловой работы мартеновских печей с использованием ГМГ новой и базовой конструкций были обработаны представительные массивы плавок (по кампаниям соответствующих печей), проведенных непосредственно до и после установки горелок новой конструкции. При этом в качестве обобщающего критерия эффективности тепловой работы мартеновских печей рассматривался удельный расход условного топлива на выплавку мартеновской стали (кг у. т./т) [5]. В результате



**Рис. 4.** Схематическое изображение контуров видимой части и результаты замеров температурных полей факелов (замеры инфракрасным пирометром «Micron M90», °C); I-III – номера завалочных окон МП; а-г – варианты различных тепловых режимов по периодам плавки



**Рис. 5.** Динамика изменения удельного расхода условного топлива (мазут + природный газ) на выплавку мартеновской стали по печам до и после внедрения газомазутной горелки новой конструкции (● – за месяц до начала внедрения); а – МП № 3, б – МП № 4, в – МП № 5, г – МП № 6

анализа выяснилось, что экономия топлива за счет использования новых горелок составила не менее 7 кг у. т./т стали. Кроме этого, имеет место экономия компрессорного воздуха (до 2500 м<sup>3</sup>/ч. на одну печь – 20-40 м<sup>3</sup>/т стали).

Установлено, что при использовании предложенного способа подачи интенсификатора горения в факел [10] оптимальная доля кислорода, подаваемого с противоположной факелу стороны, составляет около 10 % от его общего расхода. При этом за счет более полного использования теплового потенциала отходящих газов имеет место дополнительная экономия топлива  $\approx 1$  кг у. т./т стали, существенно уменьшается зарастание кислородных сопел в процессе эксплуатации ГМГ (см. рис. 6).

Высвобожденный компрессорный воздух было предложено использовать для улучшения условий

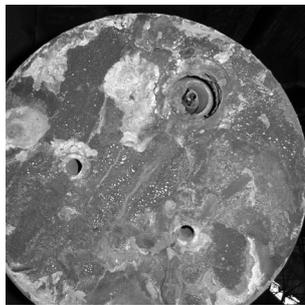


Рис. 6. ГМГ новой конструкции: вид спереди после эксплуатации на МП № 3 в течение кампании по главному своду печи

эксплуатации сводовых огнеупоров и их металлических креплений на МП. Для этого были разработаны и внедрены в производство новый способ [11] и соответствующая система охлаждения сводов печей, позволяющие за счет эффективного целенаправленного обдува изношенных участков сводов компрессорным воздухом повысить их стойкость и уменьшить количество ремонтов печей.

Фактический годовой экономический эффект от внедрения разработок только за счет экономии топлива составил  $\approx 2$  млн \$ США.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Буторина И. В., Харлашин П. С., Сущенко А. В. Пути снижения энергоемкости металлургических процессов на предприятиях Украины // *Сталь*. – 2003. – № 7. – С. 97-101.
2. Глинков Г. М., Чайкин Б. С. Энергосберегающие режимы работы мартеновских и двухванных печей. – М.: Металлургия, 1991. – 128 с.
3. Разработка и внедрение новых энергосберегающих способов отопления мартеновских печей ОАО «МК «Азовсталь» / А. В. Сущенко, А. И. Травинчев, А. В. Воробьев и др. // *Металл и литье Украины*. – 2001. – № 10/11. – С. 29-30.
4. Папич П. А., Гордеев Н. И. Усовершенствование конструкции газомазутных горелок мартеновских печей // *Сталь*. – 2005. – № 3. – С. 28-30.
5. Энергоресурсосбережение в мартеновском производстве Мариупольского металлургического комбината Ильича / В. С. Бойко, А. В. Сущенко, Е. Н. Лещенко и др. – Мариуполь: ММК им. Ильича. – 2008. – 232 с.
6. Пат. 67684А України МПК F 23 C 1/08. Спосіб спалювання палива в мартенівській печі / Е. М. Лещенко, А. В. Сущенко, В. Л. Прахнін та ін. – Опубл. 15.06.04, Бюл. № 6.
7. Пат. 67690А України МКИ F 23 C 1/08, C 21 C 5/04. Сопловий модуль газомазутного пальника мартенівської печі / Е. М. Лещенко, А. В. Сущенко, В. Л. Прахнін та ін. – Опубл. 15.06.04, Бюл. № 6.
8. Совершенствование конструкции газомазутной горелки крупнотоннажных мартеновских печей / А. В. Сущенко, Е. Н. Лещенко, А. С. Безчерев и др. // *Сталь*. – 2005. – № 12. – С. 26-28.
9. Пат. 51209 України МКИ F 23 C 1/00. Пальник мартенівської печі / С. А. Матвієнков, В. Л. Прахнін, А. В. Сущенко та ін. – Опубл. 12.07.10, Бюл. № 13.
10. Пат. 45434 України МКИ F 23 C 1/00. Спосіб опалення мартенівської печі з допалюванням газів, що відходять / С. А. Матвієнков, В. Л. Прахнін, А. В. Сущенко та ін. – Опубл. 10.11.09, Бюл. № 21.
11. Пат 35508 України, МПК F23C 1/00. Спосіб охолодження склепіння мартенівської печі / С. А. Матвієнков, В. Л. Прахнін, В. Ф. Лисенко та ін. – Опубл. 25.09.08, Бюл. № 18.

### Анотація

Сущенко А. В., Безчерев О. С., Прахнін В. Л., Фентісов І. М., Гавріков О. А., Харін О. К., Стариковський М. Л.

Вдосконалення системи опалювання мартенівських печей у ПАТ «Маріупольський металургійний комбінат ім. Ілліча»

Розроблено і впроваджено на 650- і 900-тонних мартенівських печах ПАО «Маріупольський металургійний комбінат ім. Ілліча» нові: конструкція газомазутного пальника, система подачі та регулювання витрати природного газу на печах, а також режими її опалювання, які дозволили поліпшити організацію газомазутного факела та управління тепло-технологією мартенівської плавки, отримати економію палива (мазут + природний газ) і стислого повітря.

### Ключові слова

енергозбереження, мартенівська піч, система опалювання, газомазутний пальник, природний газ, мазут

### Summary

Sushchenko A., Bezcherev A., Prahnin V., Fentisov I., Gavrikov O., Kharin A., Starikovskiy N.  
Development of the open-hearth furnaces heating system at «Ilyich Iron & Steel Works» PJSC

For «Ilyich Iron & Steel Works» PJSC 650- and 900-tonns open hearth furnaces are designed and implemented new: oil-gas burner construction, natural gas supply and consumption control system for furnace and also modes of furnace heating, allowing to improve oil-gas flame organization and open-hearth casting process heat-technology control, to save fuel (fuel oil + natural gas) and compressed air.

### Keywords

energy saving, open-hearth furnace, heating system, oil-gas burner, natural gas, fuel oil