

ТЕПЛОТЕХНІКА ТА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УДК 669.183.212

©Сущенко А.В.¹, Бесчерев А.С.², Прахнин В.Л.³, Трибрат С.В.⁴, Стариковский Н.Л.⁵

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ ГОРЕЛКА ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ МАРТЕНОВСКИХ ПЕЧЕЙ

Разработана и внедрена на крупнотоннажных мартеновских печах ПАО «Мариупольский металлургический комбинат имени Ильича» новая конструкция газомазутной горелки с двухступенчатым распыливанием мазута природным газом. Получено: улучшение организации газомазутного факела и управления теплотехнологией мартеновской плавки, экономия топлива (мазут + природный газ) не менее 7 кг у.т./т стали, а также сжатого воздуха (20 – 40) м³/т стали.

Ключевые слова: мартеновская печь, система отопления, газомазутная горелка, сопловой блок, энергоносители, теплотехнология, технико-экономические показатели.

Сущенко А.В., Бесчерев А.С., Прахнин В.Л., Трибрат С.В., Стариковський Н.Л. *Високоєфективний пальник для опалення мартенівських печей. Розроблена та впроваджена на багатотоннажних мартенівських печах ПАТ „Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча” нова конструкція газомазутного пальника з двохступеневим розпилюванням мазуту природним газом. Отримано: покращення організації газомазутного факелу та управління теплотехнологією мартенівської плавки, економія палива (мазут + природний газ) не менш ніж 7 кг.у.т./т. сталі, а також стиснутого повітря (20-40) м³/т сталі.*

Ключові слова: мартенівська піч, система опалення, газомазутний пальник, сопловий блок, енергоносії, теплотехнологія, техніко-економічні показники.

A.V. Sushchenko, A.S. Bescherev, V.L. Prahnin, S.V. Tribirat, N.L. High efficiency burner for heating open hearth furnace. *A new design of fuel oil-gas burner with two stages of dispersion of fuel oil by gas was developed and implemented at “Ilch Iron and steel works” in Mariupol. Obtained were improvement of organization of fuel oil-gas flame and management of the heat processing open hearth melting, economy of fuel (fuel oil + natural gas) not less then 7 kg of c.f./t steel, and also compressed air (20 - 40) m³/t steel.*

Keywords: open hearth furnace, heating system, fuel oil-gas burner, nozzles block, power y resource, heat processing, technical and economic indices.

Постановка проблемы. Чёрная металлургия Украины по такому важнейшему показателю, как сквозная энергоёмкость продукции, значительно отстаёт от зарубежных стран, что связано с использованием устаревшего и изношенного оборудования, а также слабым использованием современных энергоресурсосберегающих технологий [1 и др.]. По отчетным данным ПХО «Металлургпром» за 1-ое 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

¹ канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² канд. техн. наук, доц., начальник аналитического отдела управления непрерывных операционных улучшений ПАО «ММК им. Ильича», г. Мариуполь

³ заместитель технического директора по мартеновскому производству ПАО «ММК им. Ильича», г. Мариуполь

⁴ мастер мартеновского цеха ПАО «ММК им. Ильича», г. Мариуполь

⁵ начальник группы лаборатории металлургической теплотехники ЦЛМК ПАО «ММК им. Ильича», г. Мариуполь

связи с недостатком на металлургических предприятиях крупных 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 в ПАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича», где мартеновский цех занимает четвертое место по потреблению ТЭР и третье – по количеству вредных выбросов.

Анализ состояния вопроса. Совершенствование системы отопления мартеновских печей, в т.ч. конструкции сожигательных устройств и режимов подачи энергоносителей в рабочее пространство агрегата, является одним из наиболее эффективных энергоресурсосберегающих направлений, позволяющих без значительных временных и финансовых затрат существенно улучшить целый ряд технико-экономических показателей работы печей, таких как КПД, КИТ, удельные расходы топлива и других энергоносителей на выплавку стали, производительность агрегатов, вредные выбросы в окружающую среду [2 – 5].

В мартеновском цехе ПАО «ММК им. Ильича» для отопления 650 т и 900 т мартеновских печей (МП) использовались газомазутные горелки (ГМГ) с двухступенчатым распыливанием мазута предварительно подогретым (до 60 – 70 °С) компрессорным воздухом (первая ступень) и природным газом высокого давления (вторая ступень распыливания). 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 дальнотойность факела вследствие подачи «внутри» его окислителя. Положение усугубляет также повышенная влажность сжатого воздуха, особенно в осенне-зимний период времени года.

С другой стороны, применяемый для отопления МП природный газ (ПГ) имеет более высокое и более стабильное давление (0,6 – 0,7 МПа) по сравнению со сжатым воздухом. Однако, при подаче его 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.

Подача интенсификатора (кислорода) в ГМГ базовой конструкции осуществляется по двум каналам, расположенным в вертикальной плоскости под газомазутным сопловым модулем (см. рис. 1), что позволяет, в случае необходимости, эффективно перераспределять поток кислорода через ГМГ между газомазутным факелом и ванной. Однако такой вариант обладает рядом недостатков. Так, при периодической выдувке остаточного мазута из горелки (особенно при использовании для очистки каналов ГМГ водяного пара) часть мазута попадает в кислородные сопла, что является небезопасным, а также приводит к настылеобразованию на выходных участках сопел и, как следствие, к нарушению организации факела. В случаях повышенной тепловой нагрузки, за счет увеличенного расхода мазута, подача части кислорода через нижний канал может не обеспечить полное сжигание мазута в факеле.

Целью работы являлось совершенствование системы отопления мартеновских печей; разработка и внедрение новых более эффективных: конструкции ГМГ, системы подачи и регулирования природного газа на печь, а также режимов ее отопления.

Изложение основного материала. 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 распыли-



Рис. 1 – Газомазутная горелка базовой конструкции (вид спереди)

ванием 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 была разработана и внедрена новая система подачи и регулирования расхода природного газа и других энергоносителей на МП, обеспечивающая минимальные потери давления и независимое регулирование расходов ПГ по 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 горел-

кой [6].

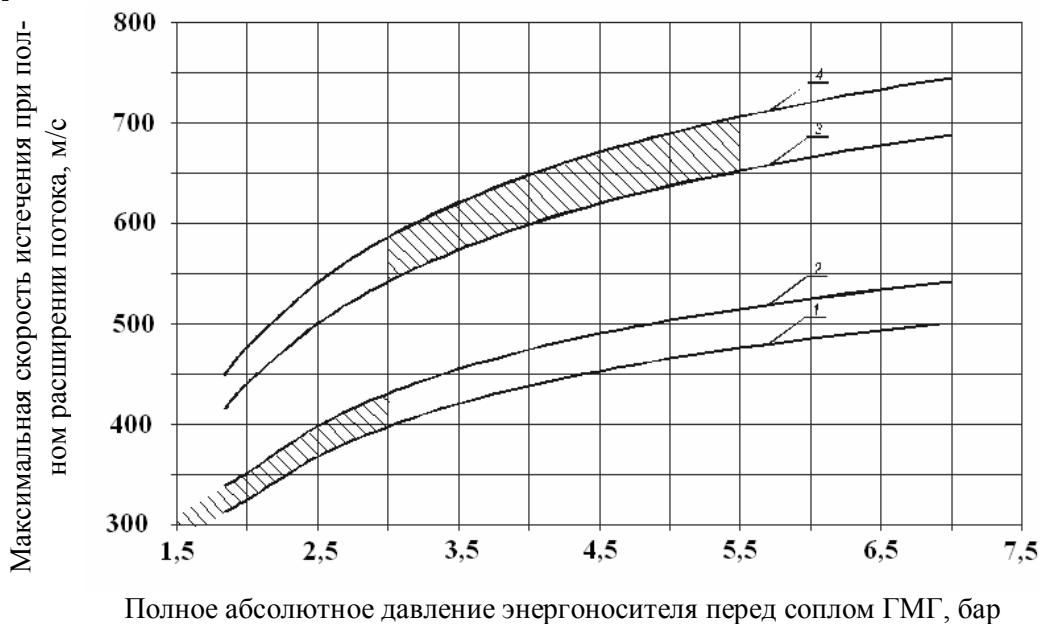


Рис. 2 - Зависимость максимальной скорости истечения сжатого воздуха и природного газа от давления и температуры. 1, 2 – сжатый воздуха при температуре 20 °С и 70 °С соответственно; 3, 4 – природный газ при температуре 20 °С и 70 °С соответственно; заштрихованная область соответствует реальному располагаемому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

Установлено, что оптимальная доля расхода природного газа, используемого в качестве первичного распылителя мазута, от общего его расхода горелку, составляет $q_1 = 15...45\%$ при абсолютном давлении природного газа перед горелкой $P_2 = (0,80...1,20) \times P_{г.ном}$, $q_1 = 30...70\%$ - при $P_2 = (0,60...0,79) \times P_{г.ном}$, $q_1 = 50...100\%$ - при $P_2 = (0,40...0,59) \times P_{г.ном}$, где $P_{г.ном}$ - номиналь-

ное абсолютное давление ПГ перед горелкой.

При недостаточной величине q_1 (для соответствующих диапазонов P_2) имеет место неудовлетворительное качество распыливания мазута, что приводит к существенному ухудшению качества сжигания топлива (химическому недожогу), уменьшению температуры факела, чрезмерному его удлинению и смещению зоны расположения корневой области ближе к концу печи. Как следствие, ухудшается топливоиспользование в рабочем пространстве агрегата в целом. При чрезмерно высоком значении параметра q_1 имеет место «перераспыл» мазута, что приводит к заметному уменьшению дальности факела. Кроме того, в этом случае величина проходного сечения газового сопла второй ступени распыливания ГМГ является достаточно малой, что сужает пределы регулирования горелки.

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 – l_x . При $l_x = (-0,2 + 0,6) d_e^{\min}$, 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, дальность и "жесткость" газомазутного факела, а также хорошая настильность и близкое к оптимальному его температурное поле. Режим истечения энергоносителей стабильный при отсутствии явления "запирания" мазутного потока.

В ГМГ новой конструкции (рис.3), 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]. Это позволяет увеличить окислительный 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, интенсификация подачи кислорода в ванну может быть легко обеспечена за счет увеличения расхода кислорода через сводовые фурмы.

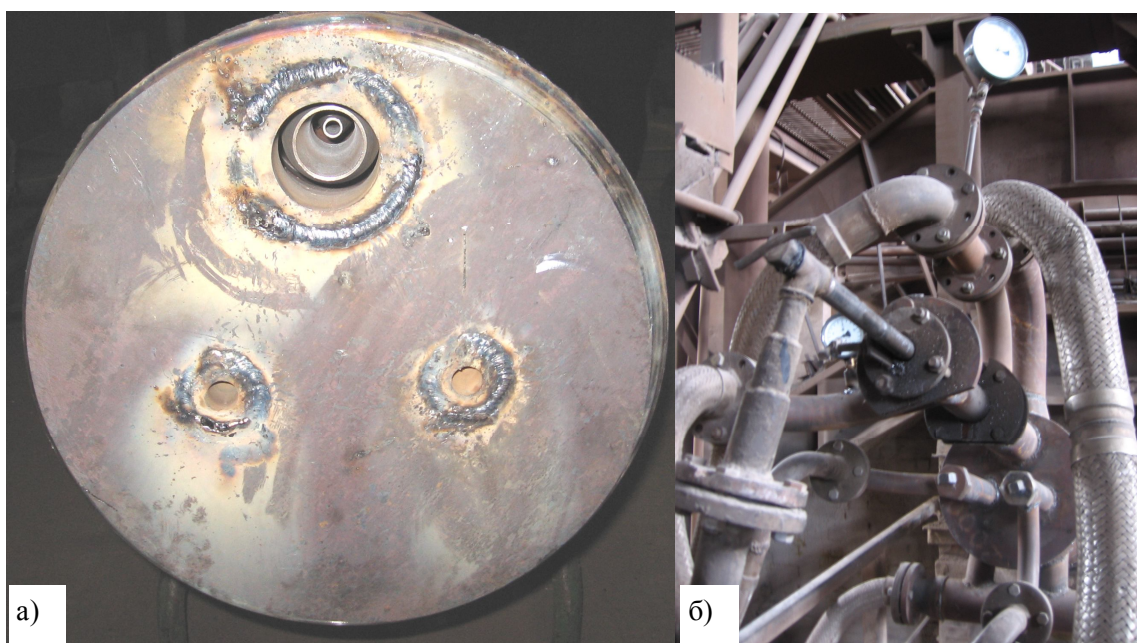


Рис. 3 - ГМГ новой конструкции: вид спереди после изготовления (а); задняя часть

в процессе опытно-промышленных испытаний на МП № 3 (б).

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 м³/ч; основной рабочий диапазон расходов ПГ - (3000 ÷ 6000) м³/ч (при работе в режиме «дежурного газа» – 2000 м³/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 около 500 м³/ч.

Опытно-промышленные испытания первой пилотной партии из двух газомазутных горелок новой конструкции были проведены на 650 т 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 они были заменены на аналогичные горелки новой конструкции (этот вариант ГМГ используется на МП № 3 непрерывно по настоящее время).

Учитывая главную роль в процессе распыливания мазута первой ступени ГМГ, в процессе плавки расход ПГ через указанную ступень поддерживали приблизительно постоянным, а суммарный расход ПГ через ГМГ регулировали посредством его расхода, подаваемого по второй ступени распыливания горелки. В зависимости от давления природного газа в цехе оптимальный его расход через первую ступень распыливания ГМГ новой конструкции составил $V_{ПГ,1} = 2000 - 2500$ м³/час. Увеличение $V_{ПГ,1}$ до 2500 м³/ч (при сохранении постоянного общего расхода ПГ на горелку) позволяет дополнительно повысить кинетическую энергию и «жесткость» факела, а также процесс распыливания мазута. Однако при этом несколько снижается длина светящейся части факела. Большее увеличение $V_{ПГ,1}$ является нецелесообразным из-за возникновения «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, т.е. только за счет природного газа. Об увеличении полноты сжигания мазута в рабочем пространстве агрегата свидетельствовало так же состояние верхней части насадок регенераторов при их обследовании на малом «холодном» ремонте печи после проведения опытно-промышленных испытаний горелок.

По итогам анализа результатов исследований параметров газомазутных факелов, полученных при использовании горелок новой и базовой (с первичным распыливанием мазута сжатым воздухом) конструкций при аналогичных параметрах подаваемых энергоносителей, получено, что применение новых горелок позволяет заметно улучшить организацию факела, в частности: увеличить его длину (на величину до одной крышки завалочного окна, т.е. на ~ 2 м), увеличить температуру в нижней части факела (на 20 – 50 °С), уменьшить температуру в верхней части факела (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 6,2 – 6,3 ати.

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

Широкомасштабное внедрение разработки в мартеновском цехе ПАО «ММК им. Ильича» было реализовано с января по август 2011 г. на всех остальных (трех 900 т) 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.

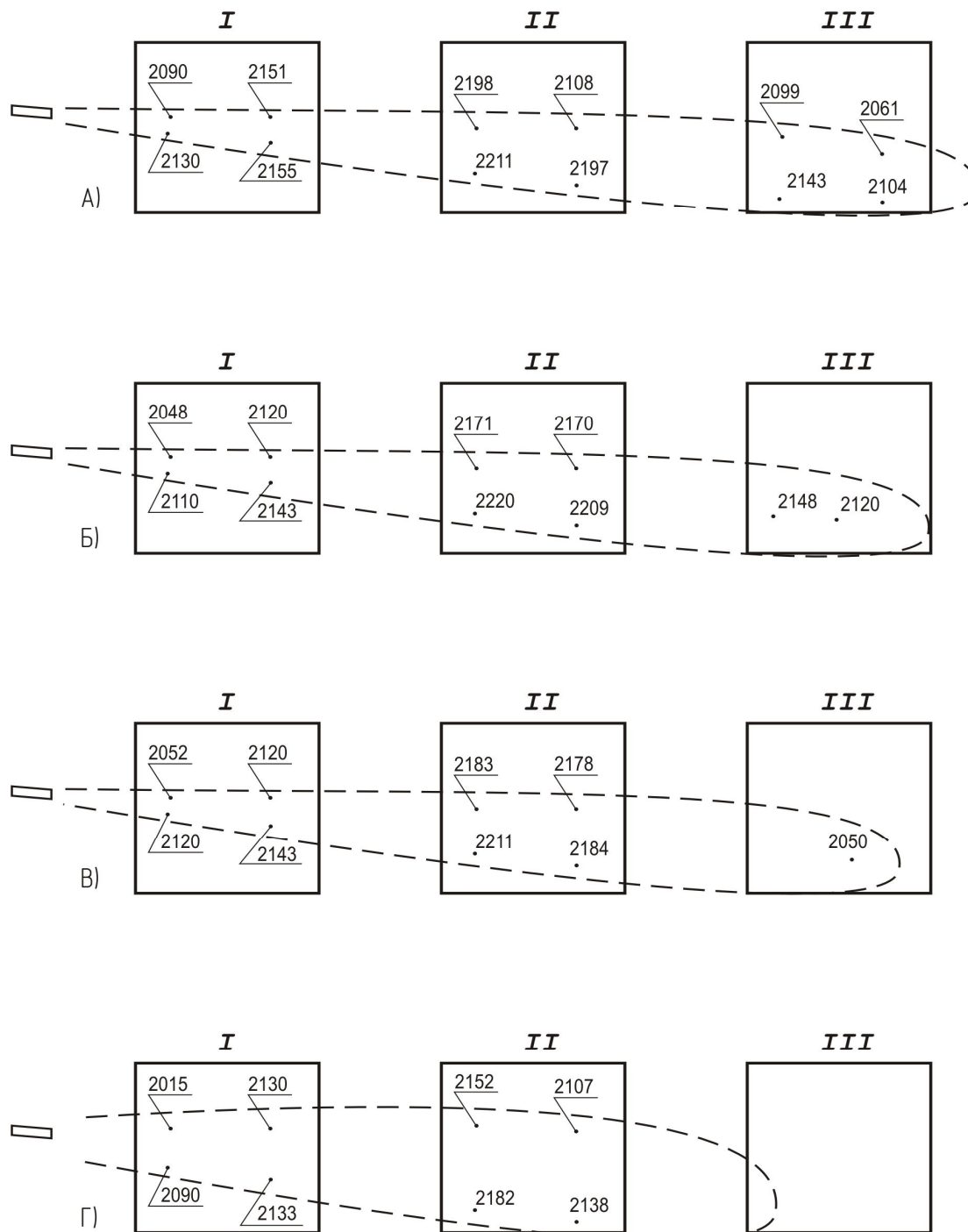


Рис. 4 - Схематическое изображение контуров видимой части и результаты замеров температурных полей факелов (замеры инфракрасным пирометром «Micron M 90», °C); I-III – номера завалочных окон МП; А-Г – варианты различных тепловых режимов по периодам плавки

Для проведения сравнительного анализа эффективности тепловой работы мартеновских печей с использованием ГМГ новой и базовой конструкций были обработаны представитель-

ные массивы плавки (по кампаниям соответствующих печей), проведенных непосредственно до и после установки горелок новой конструкции.

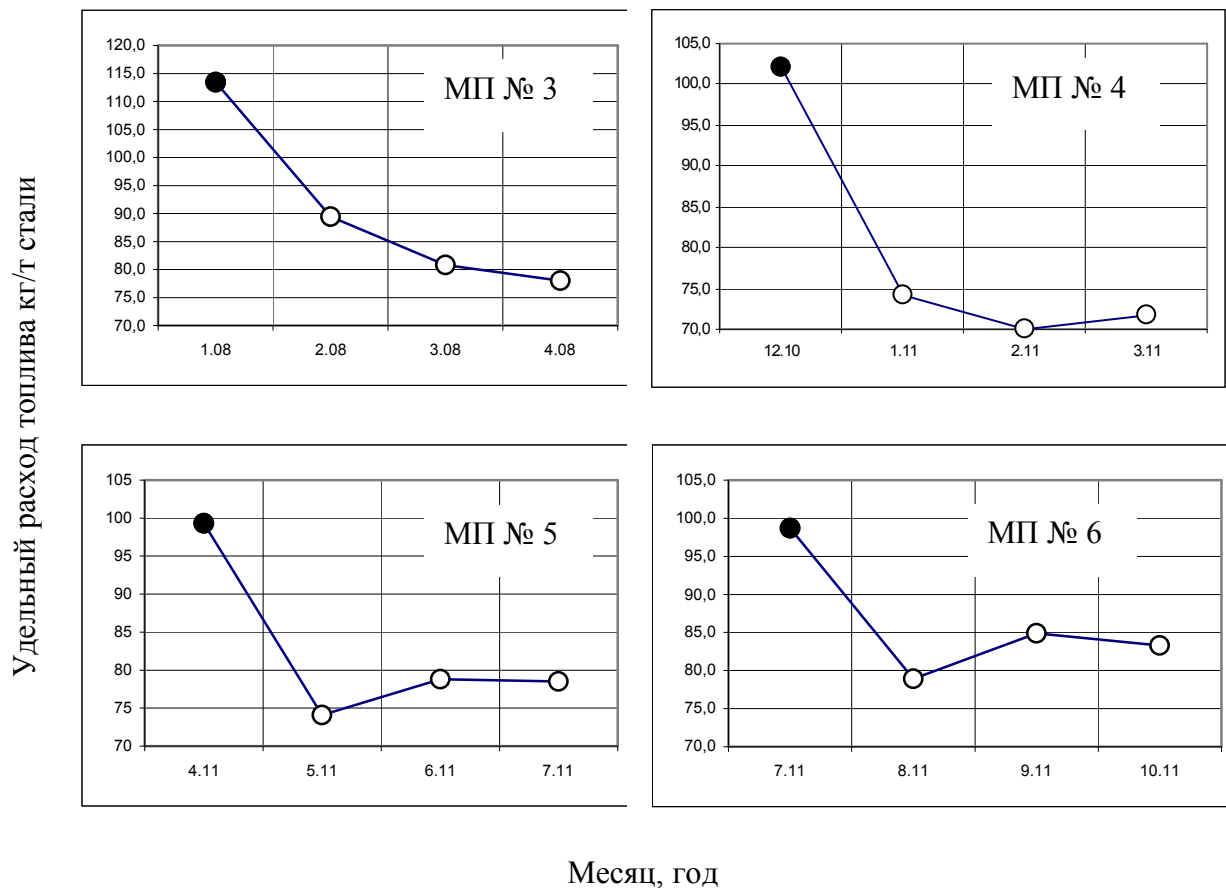


Рис. 5 – Динамика изменения удельного расхода условного топлива (мазут + природный газ) на выплавку мартеновской стали по печам до и после внедрения газомазутной горелки новой конструкции

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 анализа получено, 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 м³/час на одну печь – 20 ÷ 40 м³/т стали). Фактический годовой экономический эффект от внедрения разработки только за счет экономии топлива составил ~ 2 млн. дол. США.

Выводы

Разработаны и внедрены на 650 т и 900 т мартеновских печах ПАО «Мариупольский металлургический комбинат имени 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) не менее 7 кг у.т./т стали, а также сжатого воздуха (20 – 40) м³/т стали. Фактический годовой экономический эффект от внедрения разработки составил ~ 2 млн. дол. США.

В работе принимали участие: Е.Н. Лещенко, А.К. Харин, А.П. Балаба, Ф.М. Катенёв, В.Ф. Лысенко, А.А. Годынский, С.М. Комар, О.С. Пухальский, В.Б. Кудряшов, А.В. Подлесный, А.А. Малюк,

Н.И. Горлач, Ю.Г. Сергиенко, В.А. Бочарова, Д.Н. Шмельков, А.В. Гайдуков, В.М. Горевой, Н.С. Редя.

Список использованных источников:

1. Буторина И. В. Пути снижения энергоёмкости металлургических процессов на предприятиях Украины / И. В. Буторина, П. С. Харлашин, А. В. Сущенко // *Сталь*. – 2003. – № 7. – С. 97 - 101.
2. Глишков Г. М. Энергосберегающие режимы работы мартеновских и двухванных печей / Г. М. Глишков, Б. С. Чайкин. – М.: Металлургия, 1991. – 128 с.
3. Сущенко А. В. 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 литее Украины*. – 2001. - № 10/11. – С. 29 – 30.
4. Папич П. А. Усовершенствование конструкции газомазутных горелок мартеновских печей / П. А. Папич, Н. И. Гордеев // *Сталь*. – 2005. - № 3. – С. 28 – 30.
5. Бойко В. С. Энергоресурсосбережение в мартеновском производстве Мариупольского металлургического комбината Ильича / В.С. Бойко, А.В. Сущенко, Е.Н. Лещенко, А.С. Безчерев и др. – Мариуполь: ОАО „ММК им. Ильича”. – 2008. – 232 с.
6. Пат. 67684А Україна МПК F 23 C 1/08. Спосіб спалювання палива в мартенівській печі / Е.М. Лещенко, А.В. Сущенко, В.Л. Прахнин и др.; ММК им. Ильича. - № 20031211651; заявл. 16.12.03; опубл. 15.06.04, Бюл. № 6. – 8 с.
7. Пат. 67690А Україна 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. Прахнин и др.; ММК им. Ильича. - № 20031212853; заявл. 29.12.03; опубл. 15.06.04, Бюл. № 6. – 8 с.
8. Сущенко А. В. 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 Україна МКИ F 23 C 1/00. Пальник мартенівської печі / С.А. Матвиенков, В.Л. Прахнин, А. В. Сущенко и др.; ММК им. Ильича. - № u200913361; заявл. 22.12.09; опубл. 12.07.10, Бюл. № 13. – 6 с.

Bibliography:

1. Butorina I.V. The ways of lowing capacity of energy of metallurgical processes on the enterprises of Ukraine / I.V. Butorina, P.S. Harlashin, A.V. Sushchenko // *Steel*. – 2003. - № 7. – P. 97 – 101. (Rus.)
2. Glinkov G.M. Saving energy regimes of work of open hearth and two bath furnaces /G.M. Glinkov, B.S. Chaikin. – M. : Metallurgia, 1991. – 128 p. (Rus.)
3. Sushchenko A. V. Development and introducing new saving energy methods heating of open heath furnaces of ОАО “MP “Azovsteel” / A. V. Sushchenko, A. I. Travinchev, A. V. Vorobiev and others // *Metall i litie Ukraine*. – 2001. - № 10/11. – P. 29 – 30. (Rus.)
4. Papich P. A. Improvement of design gas – fuel oil burners of open hearth furnaces / P.A. Papich, N.I. Gordeev // *Steel*. – 2005. - № 3. – P. 28 – 30. (Rus.)
5. Boiko V.S. Saving energy in open hearth production Mariupol Metallurgical plant of Illich / V.S. Boiko, A.V. Sushchenko, E.N. Leshchenko, A.S. Bescherev and others. – Mariupol : ОАО “ММК им. Illicha”. – 2008. – 232 p. (Rus.)
6. Pat. 67684A Ukraine IPC F 23 C 1/08. Method of burning the fuel in open hearth furnace / E.M. Leshchenko, A.V. Sushchenko, A.S. Bescherev and others; ММК им. Illicha. - № 20031211651; stated 16.12.2003; published 15.06.04, Bull. № 6 – 8 p. (Ukr.)
7. Pat 67690A Ukraine IPC F 23 C 1/08, C 21 C 5/04. Module of nozzles of gas – fuel oil burner of large-tonnage open hearth furnace / E.M. Leshchenko, A.V. Sushchenko, A.S. Bescherev and others; ММК им. Illicha. - № 20031212853; stated 29.12.2003; published 15.06.04, Bull. № 6 – 8 p. (Ukr.)
8. Sushchenko A.V. Improvement design gas – fuel oil burner of large – tonnage open hearth furnaces / A.V. Sushchenko, E.N. Leshchenko, A.S. Bescherev and others // *Steel*. – 2005. - № 12. – P. 26 – 28. (Rus.)
9. Pat. 51209 Ukraine IPC F 23 C 1/00. Burner of open hearth furnace / S.A. Matvienkov, V.L. Prahnin, A.V. Sushchenko, and others; ММК им. Illicha. - № u200913361; stated 22.12.09; published 12.07.10, Bull. № 13 – 6 p. (Ukr.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 07.09.2011