

Литература

1. **Износостойкость** и механические свойства хромистых чугунов / К.Э. Барановский [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2014. – № 3. – С. 96–100.

2. **Исследования** абразивно-коррозионной стойкости хромистых чугунов / Е.И. Рожкова [и др.] // Литейщик России. – 2005. – № 12. – С. 8–9.

УДК 621.783:519

С.В. КОРНЕЕВ, канд. техн. наук,
И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук (БНТУ)

ПРИМЕНЕНИЕ ГОРЕЛОК И ИНЖЕКТОРОВ В ВЫСОКОМОЩНЫХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧАХ

Анализ теоретических исследований процессов нагрева и плавления металлошихты в ДСП, а также опыта эксплуатации дуговых печей позволяет отметить следующие направления энергетической оптимизации электроплавки:

1) минимальное использование электроэнергии, как наиболее дорогого энергоносителя;

2) использование в ДСП максимально возможных количеств относительно дешевого органического топлива, преимущественно кокса, угля, а также природного газа;

3) интенсификация процесса с сокращением времени плавки, при одновременном уменьшения энергетических потерь пропорциональных времени.

В большинстве случаев основной целью внедрения альтернативных источников энергии является повышение производительности.

Применение газокислородных горелок. За последние годы накоплен достаточный опыт использования горелочных устройств в электродуговых печах, что позволяет определить оптимальные режимы их работы. Интересны работы, в которых приводится сопоставление показателей работы до и после установки горелок. Например, в работе [1] рассмотрен опыт применения газокислородных горелок для

200-т ДСП. Горелки вводятся в рабочее пространство печи через отверстия в своде. Результаты плавки с горелками суммарной мощностью около 22 МВт (30 % мощности трансформатора) сопоставили с показателями работы печи без использования горелок. Продолжительность плавления в конкретном случае сократилась на 15 %, а всей плавки – на 7 %. Соответственно расход электроэнергии на плавление уменьшился на 12 %, на всю плавку – на 9 %. Из результатов работы следует, что при замещении мощности трансформатора в 30 % экономия электрической энергии составляет 12 %. Это связано с тем, что КИТ горелок падает при прогреве шихты. Однако при пересчете на первичное топливо использование горелочных устройств и топливных фурм экономически выгодно и, кроме того, повышает производительность печи.

Продувка кислородом. Продувка ванны кислородом позволяет увеличить скорость окисления примесей, а, следовательно, ускорить процесс расплавления шихты, что повышает производительность печей. В работе [2] показано, что погружаемая продувка при равных расходах газа значительно превосходит по интенсивности перемешивания непогружаемую продувку. Так как угар легирующих (из шихты) и железа снижается при увеличении скорости обезуглероживания, которая может быть достигнута за счет улучшения подвода углерода к месту реакции при перемешивании, то усиление импульса кислородной струи должно повышать технологические показатели плавки. Это обстоятельство подтверждается результатами работы [3]. Однако в последующие годы появились высокоэффективные непогружные способы продувки. Использованию кислорода в сталеплавильных печах посвящено большое количество работ. Эффективность и особенности применения кислорода в дуговых печах достаточно подробно рассмотрены в работе [4].

Вдувание углеродсодержащих материалов. В сталеплавильном производстве инъекция порошкообразных углеродсодержащих материалов (графита, кокса и др.) делает возможным решение следующих задач: ввод дополнительной энергии в печь; регулирование содержания углерода в металле; увеличение содержания углерода при недостатке чугуна; раскисление стали; рафинирование стали от газов и неметаллических включений выделяющимися пузырями CO.

Широкое распространение получила технология вспенивания шлака (SLAG FOAMING), основным элементом которой является инъекция с пневматическим дозированием углеродсодержащего порошка. Эта технология используется на подавляющем большинстве электродуговых печей (высокомощных), в том числе на Белорусском металлургическом заводе, и позволяет защитить водоохлаждаемые панели от излучения дуг, скрыв их под слоем шлака, а также повысить скорость необходимых химических реакций.

Рассмотрим примеры различных систем интенсификации плавки, а также достигнутые показатели при применении данных систем.

Система PYREJET™, впервые внедренная American Combustion (ACI) в середине 80-х годов, состоит из нескольких настенных инжекторов. Система может сочетать несколько многофункциональных инжекторов PYREJET™ и кислородно-топливных горелок Purox. Внутренняя часть горелки может быть быстро и легко отсоединена от камеры сгорания, что позволяет при необходимости быстро сменить горелку. PYREJET™ также оснащен сменной трубой для впрыска углерода, расположенной вблизи осевой линии горелки. PYREJET™, как правило, интегрирован в компактную медную панель с водяным охлаждением, которая является частью общей системы. Результаты эксплуатации PYREJET™ представлены в таблице 1 [5].

Таблица 1 – Результаты эксплуатации PYREJET™, полученные на более чем 300 плавках

Параметр	Значение до установки PYREJET™	Значение с установкой PYREJET™	Разница
1	2	3	4
Потребление электроэнергии, кВтч/т	412	390	-22 (-5,3 %)
Потребление природного газа, м ³ /т	0	1,5	+1,5
Потребление кислорода, м ³ /т	35	39	+4 (+11,5 %)

Окончание таблицы 1

1	2	3	4
Потребление углерода, кг/т	13	16	+3 (+23 %)
Время плавки, мин	60	57	-3 (-5 %)
Выход годного металла, %	92	92	0

Для электродуговой печи емкостью 150 т жидкой стали, работающей с долей металлized сырья более 50 % при установке системы PyreJet, получены результаты, приведенные в таблице 2 [6].

Таблица 2 – Результаты работы PYREJET™ в печи с большой долей DRI в шихте

Параметр	Значение до установки PYREJET™	Значение с установкой PYREJET™	Разница
Потребление электроэнергии, кВтч/т	610	553	-57 (-9,3 %)
Потребление природного газа, м ³ /т	0	2,7	+2,7
Потребление кислорода, м ³ /т	14	27	+13 (+92,9 %)
Расход электродов, кг/т	2,4	2,3	-0,1 (-4,2 %)
Время под током, мин.	96	88	-8 (-8,3 %)

Чтобы оптимизировать положение инжектора для каждой ЭДП, Air Liquide ACI использует различные панели. Выбор панели зависит от конкретных характеристик печи. Большие печи обычно требуют установки более глубоких панелей (DEEP, DRAGON или FIN), чтобы уменьшить огнеупорную эрозию. Для эффективного использования энергии дожигания инжекторы PC (Post Combustion) должны устанавливаться вблизи источников генерации CO. Поток кислорода PC должен иметь низкую скорость, чтобы способствовать смешиванию с печными газами и избегать окисления лома и отражения кислорода от лома до панелей с водяным охлаждением. Инжекторы также должны очень хорошо охлаждаться, так как область PC часто перегревается. Также предпочтительнее раздвоить

поток кислорода РС, чтобы более равномерно распределять энергию.

Иногда пространственные ограничения и/или соображения технического обслуживания благоприятствуют использованию всех функций, включая горелку, сверхзвуковое введение кислорода и углерода, а также последующее сжигание СО в одном устройстве. Для этих приложений АСI разработал DragonPanel™. Результаты внедрения системы PYREJET+AlarcPC™ при выплавке углеродистых сталей на предприятии Vallourec (Франция) представлены в таблице 3 [7].

Таблица 3 – Результаты внедрения системы PYREJET+AlarcPC™ при выплавке углеродистых сталей на предприятии Vallourec (Франция)

Параметр	Значение до установки PYREJET +AlarcPC™	Значение с установкой PYREJET +AlarcPC™	Разница
Потребление электроэнергии, кВт·ч/т	427	392	-35
Потребление природного газа, м³/т	3	5	+2
Общее потребление кислорода, м³/т	27	37	+10
Кислород дверной фурмы, м³/т	6	0	-6
Кислород нижней продувки, м³/т	1,3	0	-1,3
Фурмы PYREJET™, м³/т	0	19	+19
Кислород горелок, м³/т	4	10	+6
Кислород на дожигание, м³/т	15,7	8	-7,7
Потребление вдуваемого углерода, кг/т	5,5	6,5	+1
Потребление углерода в завалку, кг/т	11	12	+1
Расход электродов, кг/т	2,1	1,9	-0,2
Время плавки под током, мин	41	37	-4
Время плавки, мин	70	64	-6

Для производства кислорода необходимо использовать энергию $0,5\text{--}1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{нм}^3$, поэтому потребление электрической энергии в печи может быть уменьшено за счет более интенсивной подачи кислорода с получением до $5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{нм}^3 \text{ O}_2$ в печи в среднем для всех реакций. Кремний обладает наибольшей энергией – $11,2 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{нм}^3 \text{ O}_2$, а окисление углерода до CO – $2,73 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{нм}^3 \text{ O}_2$. На стадии рафинирования Si, P и Al полностью сгорают из-за их высокого сродства с кислородом, Fe, Mn, Cr и Mo окисляются с более высоким парциальным давлением кислорода. Диапазон энергии, приведенный в литературе, варьируется от $3,2 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{нм}^3 \text{ O}_2$ до $6,8 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{нм}^3 \text{ O}_2$ [8].

Компания BSE предложила решение по системе интенсификации VLB и CarbJet, которое заключается в достижении интенсивной инъекции кислорода без уменьшения объема печи или риска утечки воды из медных боксов, ударяемых тяжелым ломом. Поэтому VLB размещаются в боковой стенке в водоохлаждаемых коробках без расширения внутреннего пространства печи. В разных странах работает более 190 фурм-манипуляторов BSE, дополнительно установлено около 20 LM2s (фурма-манипулятор с автоматическим замером температуры). С 1999 года во всем мире установлено более 40 систем VLB.

С использованием этих систем было достигнуто среднее снижение потребления электроэнергии $40 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$ и уменьшение времени под током на 5,2 мин. В качестве примера можно привести плавильную печь 90 т с новой системой интенсификации плавки. Эта печь работала с системой предварительного подогрева лома и была оснащена 5 горелками и фурмой-манипулятором BSE. Для повышения энергоэффективности в стеновых панелях были установлены 4 VLB для работы в сочетании с фурмой-манипулятором. Время под током и потребление электроэнергии были снижены на 3 мин (9 %) и на $37 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$ (10 %) с увеличением кислорода на $2,4 \text{ нм}^3/\text{т}$ и снижением расхода газа на $0,3 \text{ нм}^3/\text{т}$. Этот результат означает, что новая технология инъекции работает более эффективно, чем предыдущая [9].

Фирма Siemens VAI предлагает технологию и оборудование SIMETAL RCB. Процесс RCB (Refining Combined Burner) – это инновационная технология вдувания кислорода, газа и углерода, которая была внедрена RCB в 1995 году. С тех пор более 100 печей были оснащены технологией RCB. Сам RCB состоит из двух частей,

которые можно легко демонтировать, – лицевой медной части с водяным охлаждением и задней части, поддерживающей инжекторы и быстросъемные соединения с носителями. Многоточечная сверхзвуковая инжекция кислорода приводит к сильному перемешиванию в ванне и химической и температурной однородности. Экономия электроэнергии может составлять до 15 %, а экономия потребления кислорода до 10 % по сравнению с другими кислородными фурмами. Конкретные конструктивные особенности обеспечивают скорость обезуглероживания до 380 кг углерода/ч на м² поверхности ванны, а также безопасную и надежную работу. Может быть достигнуто уменьшение времени плавки до 10 % и повышение производительности до 6 %. При производстве коррозионностойких сталей до и после установки системы получены следующие показатели: сокращение потребления электроэнергии 55 кВт·ч/т, сокращение потребления кислорода – 3,8 м³/т [10].

Фирма VAI Fuchs предлагает электродуговые печи серии Ultimate сверхвысокой производительности с 4-мя фурмами RCB, 2-мя топливными горелками, 3-мя РС инжекторами кислорода для дожигания CO, 3-мя инжекторами углерода.

Разработанный специализирующейся по технологиям кислородной горелки фирмой Process Technology International (PTI) и продаваемый совместно PTI и Air Products PLC, JetBOx предоставляет ряд преимуществ для работы с ЭДП. С обычными горелками и инжекторами, установленными в боковых стенках печи, сверхзвуковая струя теряет до 30 % своей скорости, что значительно снижает проникновение струи. Так как увеличение потока кислорода имеет недостатки, то часто используют метод, который заключается в том, чтобы покрыть сверхзвуковое ядро струи внешним пламенем. Такие инжекторы в настоящее время являются стандартными во многих системах. Но даже с закрытыми струями и высокими скоростями подачи кислорода значительная скорость все еще теряется на расстоянии между струйным соплом и поверхностью ванны. Поэтому в технологии JetBOx™ сверхзвуковое сопло кислорода перемещают ближе к ванне расплава, устанавливая его в водоохлаждаемой медной коробке. Этот подход создает три основных преимущества. Во-первых, это существенно уменьшает расстояние до металла по сравнению с обычными креплениями. Во-вторых, это означает, что струя может быть нацелена на более агрессивный угол атаки без

риска столкновения с огнеупорным материалом. В-третьих, трубка для подачи углерода JetBOx располагается близко к ванне расплава для улучшения вспенивания шлака.

Более 20 электродуговых печей (EAF) по всему миру оснащены системами JetBOx. В качестве примера приведем опыт немецкой сталелитейной компании Stahlwerk Thüringen (SWT) и Dongkuk Steel of Korea. Incheon Works Dongkuk Steel (Южная Корея) имеет 100-т ЭДП постоянного тока мощностью 62 МВт. До того, как была установлена система JetBOx, Dongkuk Steel уже достигла хороших показателей: потребление электроэнергии составляло 375 кВт·ч/т, а время включения – 38 мин. Результаты внедрения системы JetBOx на предприятии Dongkuk Steel представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты внедрения системы JetBOx на предприятии Dongkuk Steel

Параметр	Значение до установки JetBOx	Значение с установкой JetBOx	Разница
Потребление электроэнергии, кВт·ч/т	375	336	–39
Потребление природного газа, м ³ /т	5	5	0
Общее потребление кислорода, м ³ /т	42	42	0
Количество плавков в день	27–29	30–32	+3
Подовый электрод, плавков	1000–1200	1500	+400
Потребление углерода, кг/т	14	17	+3
Количество чушкового чугуна, %	11–12	7–8	–4
Расход электродов, кг/т	1,3	1,2	–0,1
Время плавки под током, мин	38	33,9	–4,1
Время плавки, мин	51,5	46,5	–4,0

Испытание JetBOx в Stahlwerk Thüringen началось в 2002 году с установки одного блока JetBOx. До 2002 года в печи была одна водоохлаждаемая дверная кислородная фурма, дверная горелка и шесть газокислородных горелок. После пробного периода установка JetBOx была объявлена успешной. Показатели работы представлены в таблице 5. Причем все эти меры были достигнуты без

снижения выхода годного металла. С такой проблемой ранее сталкивался SWT при попытке увеличить ввод кислорода через дверную фурму.

Таблица 5 – Результаты внедрения системы JetBOx на предприятии Stahlwerk Thuringen

Параметр	Значение до установки JetBOx	Значение с заменой 2-х горелок одним JetBOx	Разница
Потребление электроэнергии, кВт·ч/т	368	356	-12
Потребление природного газа, м ³ /т	6,5	6,9	+0,4
Общее потребление кислорода, м ³ /т	25,7	29	+3,3
Потребление углерода, кг/т	5,2	5,5	+0,3
Активный кислород, ppm	773	751	-22
Углерод на выпуске, %	0,05	0,05	0
Время плавки под током, мин	39,4	39,1	-0,3

Gallatin Steel имеет одну из крупнейших дуговых печей постоянного тока в мире. В декабре 2001 года РТИ установила две системы JetBOxTM в одной оболочке, а другая осталась без изменений. Первоначальное требование состояло в том, чтобы устранить необходимость использования дверной фурмы-манипулятора. Это позволяет сэкономить затраты на расходные материалы и обслуживание. Кроме того, это позволяет закрывать дверь для повышения безопасности и экономии энергии. Углеродная инжекция имеет две точки – через JetBOxTM и через свод. Начальные результаты после двухмесячной эксплуатации приведены в таблице 6.

Работа при закрытой двери также отразилась на более низких уровнях азота – среднее содержание азота снизилось на 7 ppm [11].

Не менее известной является технология CoJet®, представленная фирмой Praxair в 1997 году и установленная на более чем 70 электродуговых печах емкостью от 30 до 200 т (переменного и постоянного тока, включая шахтные печи и Consteel®). Особенностью тех-

нологии является длинный участок струи со сверхзвуковой скоростью [12]. Струя кислорода из когерентного инжектора перемещается значительно дальше, чем струи кислорода из обычного сверхзвукового копья. Следовательно, когерентные струйные инжекторы могут быть расположены значительно выше ванны в боковой стенке печи.

Таблица 6 – Результаты внедрения системы JetBOx на предприятии Gallatin Steel

Параметр	Значение до установки JetBOx	Значение с установкой JetBOx	Разница
Потребление электроэнергии, кВт·ч/т	448	421	-27
Потребление природного газа, м ³ /т	0	2,5	+2,5
Общее потребление кислорода, м ³ /т	29,6	22	-7,6
Выход годного металла, %	92,6	94,1	+1,5
Масса плавки, т	172	172	0
Потребление углерода на инъекцию, кг/т	9,1	6,1	-3
Потребление углерода в завалку, кг/т	5,6	3,6	-2
Расход электродов, кг/т	1,79	1,67	-0,12
Время плавки под током, мин.	47,4	45,9	-1,5
Время плавки, мин.	52,2	50,8	-1,4

В феврале 2007 года компания Praxair и Air Water, Inc заказали новую установку системы CoJet на Sumikin Steel, Wakayama Works (Япония). Электросталеплавильная 100-тонная печь имела мощность постоянного тока (DC) 53 МВт. Перед установкой системы CoJet кислород вводился через водоохлаждаемую фурму со стены и расходоуемые трубки фурмы через шлаковую дверь, поэтому безопасность рабочего персонала также была основным фактором в решении установить систему CoJet®. В таблице 7 представлены результаты работы за первые шесть месяцев после установки системы CoJet [13].

Таблица 7 – Результаты внедрения системы CoJet на предприятии SUMIKIN STEEL

Параметр	Значение до установки CoJet	Значение с установкой CoJet
Потребление электроэнергии, кВт·ч/т	349	304
Потребление коксового газа, м ³ /т	0	10
Общее потребление кислорода, м ³ /т	24	34
Производительность, т/ч	88	91
Выход годного металла, %	92,9	92,9
Потребление углерода на инъекцию, кг/т	2,9	2,6
Торкретмасса, кг/т	3,5	2,6
Время плавки, мин	68	63,8

Десятки печей, работающих в разных странах, оснащены инъекционной системой КТ компании Techint (Tenova Melt Shops). Система КТ Injection System® представляет собой настенную многоточечную систему для вдувания кислорода и широкого спектра материалов: углерода, извести, DRI и других. Инжекторы используют запатентованную систему Ultra Safe Cooling System, позволяющую безопасно погружать их в шлак. На основе опыта компании Techint по внедрению системы КТ были сделаны следующие выводы: если ЭДП имеет показатели общего расхода энергии, значения которых выше среднего уровня (расположены выше кривой, отражающей средний расход), то после ввода системы КТ они скачкообразно снижаются примерно на 75 кВт·ч/т [14]. При этом значения данного показателя попадают в зону, расположенную ниже уровня кривой, отражающей средний уровень общего расхода энергии. Если ЭДП имеет показатели удельной производительности ниже средней кривой, то после ввода системы КТ имеет место их скачок на уровень выше данной кривой, по крайней мере, на 0,25 т/ч/МВт [14].

Комплекс мер по модернизации ЭДП с использованием техники многоточечного вдувания кислорода и углерода также предложен фирмой Stein Injection Technology. Например, технология была внедрена на 150-т ДСП завода Tianjin Pipe Manufacturing Company (Китай) с получением следующих результатов: сокращение потреб-

ления электроэнергии составило 108 кВт·ч/т; суммарный расход природного газа – 6,2 м³/т; суммарный расход кислорода – 37,5 м³/т; суммарный расход углерода – 7,2 кг/т; увеличение производительности – 34 % [15].

Фирмой «Струйные технологии» предлагаются технические решения по системам интенсификации плавки с использованием подвижных горелок и фурм. Для повышения коэффициента полезного действия факела стеновые горелки-инжекторы устанавливаются на манипуляторы, с помощью которых сканируют пространство печи, нагревая, а затем и подрезая очередные порции лома [16].

Одним из лидеров в изготовлении оборудования для технологий вдувания материалов является фирма MORE. Развитием инъекционных технологий фирмы MORE явилось создание модульных систем, сочетающих в себе продувку кислородом в сверхзвуковом режиме с инъекцией углеродсодержащих материалов в дозвуковом режиме (технология Ni_JET), а также продувку кислородом (OxygenJet) и углеродом (CarbonJet).

В 2007 году на Белорусском металлургическом заводе была произведена реконструкция каркаса печи ДСП-2 с установкой новой системы интенсификации. В настоящее время на БМЗ две 100-т печи (ДСП-2 и ДСП-3) оснащены аналогичной системой интенсификации фирмы MORE, а одна печь ДСП-1 – новой системой интенсификации на основе оборудования PyreJet и Alarc-PC фирмы American Combustion (ACI).

Для оценки показателей ДСП-2 были выбраны массивы плавок с 2007 по 2016 год. Марка стали во всех случаях взята СтЗсп. На рисунке 1 приведена взаимосвязь между энергией экзотермических реакций от сжигания природного газа и продувки кислородом и расходом электрической энергии для системы интенсификации плавки, установленной в печи ДСП-2 Белорусского металлургического завода и по данным эксплуатации систем PyreJet и JetVOx, приведенных в работах [5–11], а также средние значения до внедрения новой системы на ДСП-2 БМЗ и после.

Энергия экзотермических реакций определялась по формуле

$$W_{\text{экз}} = q_{\text{пг}}z_{\text{пг}} + q_{\text{ок}}z_{\text{ок}}$$

где $q_{\text{пр}}$ и $q_{\text{ок}}$ – удельный расход природного газа и кислорода на продувку и дожигание соответственно, $\text{м}^3/\text{т}$; $z_{\text{пр}}$ и $z_{\text{ок}}$ – тепловой эффект горения природного газа и окисления углерода и других примесей при использовании кислорода, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ (9 и $3,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ соответственно).

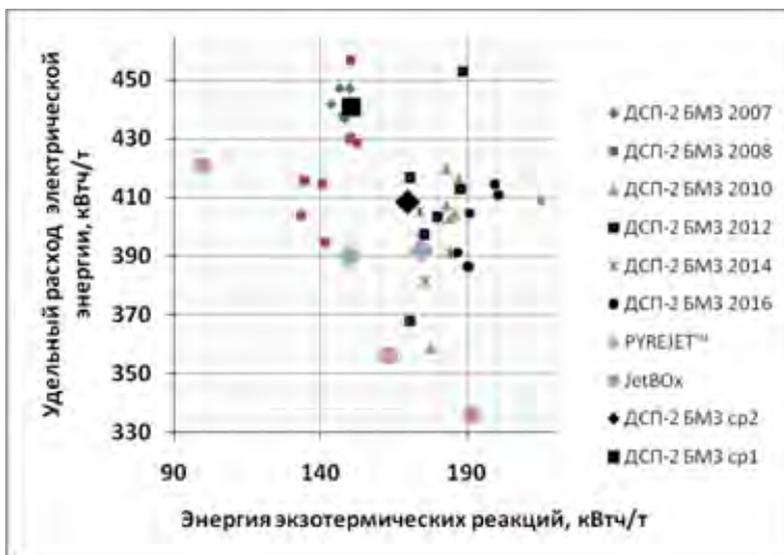


Рисунок 1 – Взаимосвязь между энергией экзотермических реакций от сжигания природного газа и продувки кислородом с расходом электрической энергии

Так как кислород является окислителем, а не топливом, то тепловой эффект окисления элементов взят усредненным и в каждом конкретном случае он изменяется в зависимости от количества подаваемых углеродсодержащих материалов, количества углерода и других элементов в шихтовых материалах и эффективности дожигания CO . Из рисунка 1 следует, что по результатам конкретных плавков наблюдается разброс значений удельного расхода электрической энергии в зависимости от количества подаваемого кислорода и природного газа (кроме того эффективность использования инжекторов косвенно связана с поддержанием вспененного состояния шлака и отражается на удельном расходе электрической энергии посредством тепловых потерь через корпус и свод печи). В свя-

зи с этим для оценки эффективности использования средств интенсификации плавки до и после модернизации необходимо использовать большие массивы данных по плавкам с усреднением показателей. В таблице 8 приведены основные показатели использования средств интенсификации плавки до и после модернизации печи ДСП-2.

Таблица 8 – Основные показатели использования средств интенсификации плавки до и после модернизации печи ДСП-2

Технологические параметры	До модернизации	После модернизации
Длительность плавки, мин: общая под током	63,6	53,4
	45,1	37,5
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т	440,5	408,6
Удельный расход кислорода на плавку, м ³ /т	28,2	35,8
Удельный расход природного газа на плавку, м ³ /т	5,78	4,92

После проведения модернизации за счет незначительного увеличения расхода кислорода (в среднем на 7,6 м³/т), начала использования инъекции угольной пыли типа В (до модернизации не использовалась), а также использования новых горелок с большей мощностью, удалось добиться снижения потребления природного газа на 0,86 м³/т, а также уменьшения расхода электроэнергии примерно на 32 кВт·ч/т. Используя полученные данные, далее можно определить и экономическую эффективность использования средств интенсификации.

Заключение. Применение топлива и кислорода в высокомошных электродуговых печах стало неотъемлемой частью технологий выплавки стали.

Тенденцией совершенствования средств интенсификации является отказ от дверных фурм манипуляторов и замена стеновых горелочных устройств на модули, содержащие одновременно горелки и инжекторы, повышение равномерности ввода энергии в рабочее

пространство и ванну, повышение эффективности дожигания СО в рабочем пространстве и одновременное управление шлаковым режимом с целью поддержания его во вспененном состоянии. Совершенствование конструкций и расположения горелочных устройств и инжекторов приводит к тому, что более высокие показатели можно получить, не увеличивая количество используемого топлива и кислорода, а в ряде случаев, сокращая его потребление.

Литература

1. Применение высокоомощных газокислородных горелок на 200-т ДСП / А.А. Устюгов [и др.] // Освоение новых высокоомощных электропечей / Тематический отраслевой сборник. – М., 1982. – С. 32–34.

2. Высокомощные электропечи и новая технология производства электростали / Ю.Н. Тулуевский. – М., 1981 с. 53–56

3. Кацман, Ц.Л. Интенсификация обезуглероживания хромоникелевого расплава в 100-т ДСП / Ц.Л. Кацман, Л.Я. Рудашевский, В.С. Галян // Освоение новых высокоомощных электропечей / Тематический отраслевой сборник. – М., 1982. – С. 32–34.

4. Лопухов, Г.А. Применение кислорода в дуговых сталеплавильных печах / Г.А. Лопухов // Электрометаллургия. – 2005. – № 3. – С. 2–27.

5. PYREJET™ – A multi-function system for EAF steelmaking: industrial result at LME (France) / J.M. Thebault [et al.] // 7th European Steel Making Conference, 26-29 May, Venice, Italy, 2002. – 10 p.

6. Адаптация работы электродуговой печи к нетрадиционным сырьевым материалам / М. Грант [и др.] // Metallurg. – 2014. – № 2. – С. 48–56.

7. Advanced EAF oxygen usage at Vallourec-mannesmann Saint saulve steelworks / S. Cantacuzene // Ironmaking & Steelmaking. – 2005. – Vol. 32. – No. 3. – PP. 203–207.

8. Total energy consumption in arc furnaces / W. Adams [et al.] // MPT International. – 2002. – No. 6. – PP. 44–50.

9. Improvement of energy efficiency in EAF steelmaking / A. Opfermann [et al.] // Millennium steel. – 2009. – PP. 65–72.

10. Применение системы RCB для вдувания кислорода в электродуговые печи / П. Моксон [и др.] // Черные металлы, апрель 2004. – С. 89–92.

11. Brhel J. The JetBOX™ burner/injector system for EAF steelmaking / J. Brhel, Ch. Farmer, V. Shver // Millennium steel. – 2006. – PP. 87–91.

12. Warty, S.K. Praxair's CoJet® gas injection system – delivering benefits, and gaining useful knowledge for future enhancements / S.K. Warty, P.C. Mathur // Electric Furnace Conference Proceedings, ISS (Warrendale, PA). – 2002.

13. Installation of Praxair's CoJet® Gas Injection System at Sumikin Steel and other EAFs with Hot Metal Charges / L. Cates [et al.] // AISTech 2008 Iron & Steel Technology Conference Proceedings, Pittsburgh, PA. – 2008.

14. Оценка эффективности работы электродуговых печей при использовании инжекционной системы КТ / «Черметинформация» // Бюллетень «Черная металлургия», 2004. – № 11. – С. 53–59.

15. Данилов, Е.В. Оптимизация работы дуговых сталеплавильных печей / Е.В. Данилов // Металлург. – 2003. – № 7. – С. 60.

16. Национальный Интернет-портал РФ [Электронный ресурс]. <http://www.jettechnologies.ru> (дата обращения: 10.09.2017).

УДК 662.951.2.006.354

**И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук (БНТУ),
С.М. КАБИШОВ, канд. техн. наук (ГКНТ РБ),
П.Э.РАТНИКОВ, канд. техн. наук (БНТУ)**

ОЦЕНКА ЭКОНОМИИ ТОПЛИВА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕКУПЕРАТИВНЫХ ГОРЕЛОК В НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ

В настоящее время при проектировании и модернизации действующих нагревательных и термических печей, функционирующих в машиностроительном производстве, широкое распространение получают рекуперативные и регенеративные горелки. В ряде работ, например [1–6], отмечается, что их использование позволяет