УДК669.17.046.517В:669.187.2.036.6: 621.365.22

В.П.Пиптюк, И.В.Крикент[1], В.Ф.Поляков, И.А.Павлюченков[1], С.В.Греков

ВИДЫ И ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ МОДУЛЯ НАГРЕВА УСТАНОВКИ КОВШ–ПЕЧЬ

Институт чёрной металлургии НАН Украины, Днепродзержинский государственный технический университет[1]
(В работе принимали участие В.А.Буршитин, В.Ю.Галенко)

Рассмотрены виды используемых энергоносителей нагревательного модуля установок ковш–печь и дуговых сталеплавильных печей. Обсуждены особенности их применения в электросталеплавильном производстве и для внепечной обработки стали. Показана целесообразность исследований влияния рода тока на характер процессов тепло –, массообмена в ванне установки ковш–печь.

В настоящее время практически все действующие установки ковш–печь (УКП) в СНГ и Украине оснащены нагревательными модулями, работающими от источника переменного тока. По данным [1] в качестве альтернативных источников нагрева на УКП возможно использование плазменного и дугового разрядов постоянного тока.

Из зарубежных публикаций [2,3] известно об использовании плазменных УКП постоянного и переменного тока емкостью 30 т и 80 т на заводах Krupp Stahl AG (Германия) и Kakogawa Works, Kobe Steel (Япония) с 1989 г. и 1991 г. соответственно. В обзорной статье [4] сообщается об эксплуатации УКП емкостью 136 т с плазменным нагревом на сталеплавильном мини–заводе Chaparral Steel (США). Авторы указанной статьи приводят схему (рис. 1) плазменной УКП разработки американской корпорации PEC емкостью 200 т, оборудованной дуговым плазмотроном постоянного тока мощностью до 5,5 МВт (1,25 кВ; 4,4 кА).

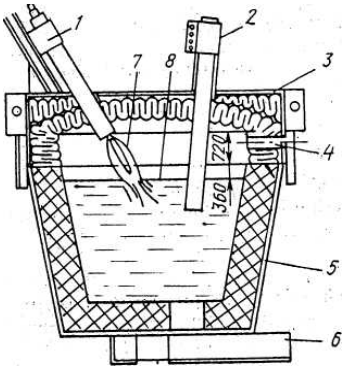

Рис. 1. Конструкция плазменной УКП с дуговым плазмотроном постоянного тока: 1– плазмотрон; 2– графитовый стержень; 3– водоохлаждаемый свод; 4–газоотвод; 5– ковш; 6– скользящий шиберный затвор; 7– плазменная дуга; 8– уровень металла.

Плазмотрон установлен в водоохлаждаемом своде на расстоянии, равном половине радиуса ковша от футеровки под углом 60° к плоскости зеркала металла. Электрический контакт с жидким металлом обеспечивается путем погружения графитового

стержня–электрода диаметром 230 мм. В футеровке ковша расположены термопары для контроля ее температуры в процессе плазменного нагрева (0,5 – 1,5ч) и выдержки (до 5ч). Для интенсификации теплообмена металл в ковше продувают аргоном (0,2 – 0,25 $м^3$/мин).

Исследование плазменного нагрева, по мнению авторов [5], является перспективным направлением, обеспечивающим хорошее качество металла за счет снижения содержания в нем вредных примесей и газов.

Сообщается о вводе в действие в конце 1995 г. фирмой Hitachi Metals плазменного рафинировочного агрегата емкостью 60 т. на заводе Ясуги (Япония). Тепловая мощность агрегата 8 МВт, максимальная скорость нагрева – 4°С/мин. В качестве плазмообразующего газа используется аргон, а нерасходуемый электрод изготавливается из вольфрама. Среда в объеме рабочего агрегата отличается высокой чистотой, т.к. заполнена аргоном. Поэтому не происходит насыщение металла азотом и водородом из атмосферы рабочего пространства. Использование УКП с плазменным нагревом, кроме подогрева сталей с повышенными требованиями к чистоте, позволяет, например, осуществлять ввод титана, вольфрама и молибдена на более ранних этапах, обеспечивая, тем самым, более точное и надежное регулирование химического состава стали.

Процесс нагрева металлического расплава на УКП с принципиальной точки зрения не отличается от аналогичного процесса, происходящего в дуговой сталеплавильной печи (ДСП). Хотя и имеет отличительные признаки, о которых будет сказано ниже. Поэтому при рассмотрении физической (электрической) стороны работы модуля нагрева УКП исследователи, как правило, отождествляют их с работой ДСП [5,6].

Рассматривая технологические особенности выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах постоянного тока (ДСППТ) авторы [7] сообщают, что при разработке и освоении в бывшем СССР (1967 г. – завод «Сибэлектросталь» и 1970 г. – ЧМЗ) первых в мире плазменных печей постоянного тока (ПППТ) были решены многие вопросы, необходимые для развития ДСППТ, и выявлен ряд особенностей и преимуществ, связанных с нагревом дугой постоянного тока.

Однако, отмечают авторы, опыт эксплуатации плазменных печей позволил выявить не только положительные, но и отрицательные стороны работы этих печей. Было установлено, что затраты по переделу в плазменной печи по сравнению с ДСП на 30–50 % выше. Это связано с большим расходом огнеупоров из–за более низкой стойкости футеровки стен и свода, несколько большим удельным расходом электроэнергии, повышенным расходом аргона и воды. Компенсировать эти дополнительные затраты можно только при выплавке методом сплавления высоколегированных отходов и свежих шихтовых материалов в результате уменьшения угара металлошихты и более полного усвоения легирующих. По мере упрощения сортамента, сообщают авторы, компенсирующая роль этого фактора уменьшалась.

Как было установлено, повышенные расходы по переделу в плазменных печах связаны, в основном, с недостатками, свойственными «классическим» плазмотронам с металлическим катодом: необходимостью работы на длинных дугах (не менее 300 мм даже в рафинировочный период), следовательно, с повышенной тепловой нагрузкой на футеровку стен и свода; недостаточной надежностью работы плазмотронов; необходимостью подачи через плазмотрон значительного количества аргона (не менее 5 $м^3$/т) для обеспечения их работоспособности; бесперспективность попыток создания плазмотронов большой единичной мощности (мощность «классических» плазмотронов в мировой практике не превышает 5 МВт при максимальной токовой нагрузке 12 кА).

Поэтому, по мнению авторов [7], плазменные печи с «классическим» плазмотроном не могли иметь перспектив широкого применения не только в «большой» электрометаллургии, но и в цехах «малой» металлургии при выплавке стали специального назначения.

Это послужило причиной того, что в 1978 г. на 12–т и одной из 6–т ППЛТ (ЧМК) был установлен плазмотрон с графитовым катодом (ПГК), состоящий из водоохлаждаемого полого металлического штока с закрепленным на его рабочем торце графитовым электродом–катодом. Поэтому данный нагреватель получил условное название «плазмотрон». Использование ПГК взамен «классического» плазмотрона позволило исключить все недостатки свойственные последнему и сохранить все основные преимущества ППЛТ.

В 1988 г. на заводе фирмы Маннесман Демаг (Германия) по разработкам фирмы МАН–ГХХ была создана первая ДСППТ емкостью 12 т, в которой в качестве нагревателя использовали обычный сплошной графитовый электрод. По сути печи с ПГК ЧМК и печь МАН–ГХХ – разновидности одного и того же типа печей: ДСППТ [7]. Имеются также данные об успешном опыте эксплуатации ДСППТ на заводах США [8], Западной Европы [9] и Азии [10].

К настоящему моменту, по разным данным [5,11], от 45 до 70 % вводимых электросталеплавильным печей спроектированы на постоянном токе. Основные отличия ДСППТ от дуговых сталеплавильных печей трехфазного (переменного) тока (ДСПТТ) подробно рассмотрены в публикациях [1,6–8,10,12]. К числу их относятся:

– более стабильное горение дуги (менее интенсивный газообмен между атмосферой и печным пространством, что замедляет окислительные процессы в ванне);

– осуществление нагрева (в одноэлектродных ДСППТ) одной дугой, равной по мощности, либо большей суммарной полезной мощности 3–х дуг ДСПТТ, но расположенной по оси ванны. Это обеспечивает более равномерную нагрузку на стены, создает более благоприятные условия плавления шихты, позволяет вводить большую удельную мощность и

повысить в итоге производительность при прочих равных условиях. Однако осевое расположение электрода вносит различия в распределение тепла по глубине и радиусу ванны по сравнению с ДСПТТ;

– отсутствие периодического изменения полярности дуги (эмиттером разряда – катодом при этом служит сводовый графитовый электрод, а не попеременно электрод и нагреваемый металл или шихта) обеспечивает снижение интенсивности испарения составляющих шихты и, как следствие, уменьшение пылеобразования, т.к. плотность тока и теплопоток в анодном пятне на порядок ниже, чем в катодном, поэтому скорость испарения с ванны–анода меньше;

– наличие теплопроводящей подины или подового электрода требует удовлетворительного контакта между шихтой и анодом, что особенно важно в момент старта процесса на ДСППТ;

– протекание рабочего тока по объему ванны от анодного (подового) электрода к дуге и минимальная индуктивность короткой сети;

– отсутствие поверхностного эффекта при протекании по проводнику постоянного тока позволяет повысить токовую нагрузку на электрод на 20 – 30 %;

– менее сложная конструкция пылегазоудаления;

– минимизация количества разгерметизаций рабочего пространства за счет использования кондукционного электромагнитного перемешивания;

– снижение уровня шума и уменьшение фликер–эффекта на 50–70 %, уменьшение удельного расхода графитовых электродов в 2–5 раз и электроэнергии на 5– 15 %, уменьшение расхода легирующих, раскислителей и огнеупоров на 15–20 %.

Отмечается, что использование ДСППТ с учетом вышеуказанных отличий (за вычетом расходов на подовый электрод) обеспечит экономию не менее 5 долл. США на 1 т стали. Дополнительные затраты при строительстве ДСППТ взамен ДСПТТ составляют 30–50 %, но (по зарубежным данным) окупаются в течении 0,5–1 года эксплуатации.

К общим научно–исследовательским и конструкторским проблемам при разработке плавильных и рафинировочных агрегатов постоянного тока авторы вышеуказанных публикаций относят следующие: разработку сильноточных источников питания (до 150 кА и выше) постоянного тока; создание оптимальной конструкции анодного узла (подового электрода) для тока 150 кА и выше; совершенствование конструкций катодного узла (сводового нагревателя) для токовой нагрузки до 150 кА и выше; создание эффективного перемешивания металла за счет протекания тока по ванне. При этом подчеркивается различие преследуемых целей: для ДСППТ (стабилизация положения дуги, ускорение плавления шихты, экономия электроэнергии) и для УКП постоянного тока (выравнивание химического состава ванны, ускорение растворения легирующих, усреднение температуры металла по объему ковша).

Вместе с тем существует мнение [13], что преимущества ДСППТ в экономии электродов нивелируются высокой ценой графитированных электродов большого диаметра, которыми они должны быть оснащены для обеспечения требуемой величины вводимой мощности. Кроме того, необходимость оснащения ДСППТ дорогостоящими преобразователями и затраты по обеспечению надежного функционирования подовых электродов значительно удорожают затратную часть. Это и сравнение показателей работы современных ДСПТТ и ДСППТ приводит авторов к выводу об отсутствии преимуществ одних перед другими. Кроме того, авторы подчеркивают, что ДСПТТ традиционной конструкции имеют большие резервы в своем развитии.

Ссылаясь на результаты исследований западных специалистов отмечают преимущества ДСППТ перед ДСПТТ [14]. Однако в статье [15] сообщается не только о том, что идея оснащения ЭСПЦ–3 ЧМК (ОАО «Мечел») УКП постоянного тока была отвергнута «из–за ограниченных технологических возможностей и сложности электрического оборудования» и, в результате чего была создана УКП переменного тока, но и ввиду отсутствия успехов внедрения в эксплуатацию 160 т УКП постоянного тока на НЛМК. Вышеуказанное обоснование решения по оснащению УКП ЭСПЦ–3 ЧМК, с учетом более чем 20–ти летнего положительного опыта эксплуатации ДСППТ емкостью 6т и 12т [7], выглядит довольно противоречиво, как, впрочем, и вся вышеприведенная информация о целесообразности использования переменного или постоянного тока в плавильных агрегатах и УКП.

Приведенная авторами [16] информация о видах плавильных печей и УКП переменного и постоянного тока, используемых в мировой металлургической практике, свидетельствует о применении такого оборудования в современном сталеплавильном производстве. По мнению авторов на текущий момент для дуговых печей постоянного или переменного тока с одинаковой установленной мощностью и системой автоматизации расходы по производству стали могут быть одинаковые.

Представляют интерес работы российских исследователей последнего времени [11,17–24] по изучению особенностей влияния электрических, электромагнитных и энергетических параметров на процессы происходящие в пространстве и ванне ДСППТ и ДСПТТ, в т.ч. на разных этапах электросталеплавильного передела.

Рассматривая особенности формирования плавильной зоны в ДСППТ и ДСПТТ отмечается, что путь прохождения постоянного тока в печном пространстве не меняется и находится рядом или на оси симметрии печи (при одноэлектродном варианте) [17]. Отсутствие поверхностного (скин –) эффекта в ДСППТ позволяет увеличивать токовые нагрузки и использовать электроды большего диаметра. На жидкой ванне ДСППТ емкостью 60–100 т длина дуг находится в пределах 700–900 мм, а напряжение в жидкий период поддерживается на уровне 200 – 300 В.

Автор показывает целесообразность использования переменного (трехфазного) тока в «открытый» и жидкий периоды плавки.

В работе [18] рассматриваются возможности объединения преимуществ разных типов (ДСППТ и ДСПТТ) печей. Для достижения максимальных значений КПД на протяжении всей плавки авторы исследований предлагают «закрытый» период плавки проводить на постоянном токе, а «открытый» и жидкий в соответствии с рекомендациями предыдущей публикации.

Представлены результаты расчета КПД дуг в печах разного типа и емкости [19]. Показана целесообразность применения ДСППТ для емкости тигля 3–25 т. По мнению авторов, несмотря на длинную (1000мм) дугу, при плавке в ДСППТ с емкостью тигля 150 т, ее КПД выше, чем в ДСПТТ (рис.2), т.к. слой пенистого шлака толщиной 500 мм закрывает ее часть и, таким образом, повышает КПД.

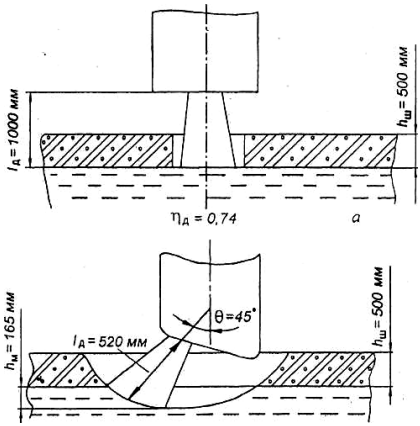

Рис.2. Окончание расплавление шихты в печах ДСППТ – 150 (а) и ДСПТТ– 150 (б), где $\eta_д$ – КПД дуги; $L_Д$ – длина дуги; $h_м$ – глубина проникновения электродуги в металл; θ – угол отклонения оси дуги от оси электрода.

Длина дуги в ДСПТТ короче, но за счет электромагнитного «выдувания» отклонена от оси электрода (угол отклонения в ДСПТТ, емкостью 150 т в 2 – 3 раза больше, чем в ДСПТТ емкостью 3 – 25т), оттесняет слой пенистого шлака к стенкам ковша, «оголяет» дуговой промежуток и увеличивает потери излучением.

В одной из последних статей [11] те же авторы рекомендуют для высокомощных печей использование постоянного тока в течение всей плавки, но лишь с той разницей, что «закрытый» период плавки вести одной дугой, а последующие периоды двумя – четырьмя электродугами.

Неоднозначность в оценке применения того или иного рода тока при выплавке и внепечной обработке стали, а также реальность использования оборудования с применением в качестве энергоносителя переменного и постоянного тока, определяет целесообразность исследований влияния вида энергоносителя на характер и динамику процессов обработки стали на УКП.

Одновременно с вышеуказанными в России осуществляются исследования по интенсификации процессов перемешивания ванны в

ДСППТ [22 – 24]. Анализ публикуемой информации свидетельствует о поисках технических и конструкторских решений в указанном направлении.

Ограниченность информации и противоречивость приведенных данных показывают необходимость изучения возможного влияния на кинетику тепло–, массообмена ковшевой ванны УКП используемого рода тока модуля нагрева.

1.*Нагрев* стали разрядом постоянного тока на установках внепечной обработки / Г.И. Окороков, А.И. Донец, Ал.Г. Шалимов и др. // Сталь. – 1995. – № 5. – С. 36 – 40.

2.*Neuschutz Dieter, Schubert Karl* – Henz, Bebber Hans J. Металлургические результаты работы 30 т плазменной печи – ковша. Metallurgical results from a 30t AC plasma ladle furnace // Proc. 6th 1nt. 1ron and Steel Congr. Nagoya, Oct. 21 – 26. 1990. Vol. 1 – Tokyo, 1990. – P. 543 – 550.

3.*Bebber H., Espendiller B*. Плазмотрон делает печь – ковш более чистым агрегатом. Plasma forch cleans up the ladle furnace // Steel Times. – 1991. – 219, № 12. – P. 665 – 666.

4.*Егоров А.В., Балковой Ю.В., Моржин А.Ф*. Плазменные технологии в черной металлургии // Бюллетень НТИ. Черная металлургия. – 1990. – № 6. – С. 14 – 23.

5.*Производство* стали на агрегате ковш – печь / Д.А. Дюдкин, С.Ю. Бать, С.Е. Гринберг и др. – Донецк : ООО «Юго – Восток» ЛТД, 2003. – 300с.

6.*Концепция* электросталеплавильных цехов с комплексами постоянного тока / Г.Н. Окороков, А.З. Шевцов, А.И. Донец и др. // Сталь. – 1997. – № 6. – С. 42 – 45.

7.*Технологические особенности* выплавки стали в дуговых печах постоянного тока и перспективы их использования / Г.Н. Окороков, А.И. Донец, Ал. Г. Шалимов и др. // Сталь. – 1994. – № 5. – С. 24 – 30.

8.*Джон Сикас, Свен–Эйнар Стенквист, Ханс–Гюнтер Кунце*. Опыт работы одноэлектродной дуговой печи постоянного тока на предприятии Флорида Стил Корпорейшн // Металлургический завод и технологии. – 1988. – С.16 – 23.

9.*Райнер Гармсхаузен, Гунтер Хорниг, Дитмар Эккардт*. Энергетическое оборудование и техника управления для новой дуговой печи постоянного тока на заводе Пайне фирмы Пройссаг Шталь АГ // Металлургический завод и технологии. – 1997. – С.46 –52.

10.*Ксью Ксингнэн*. Развитие дуговых печей постоянного тока // Steel Times International. – 1992. – Февраль. – С. 10 – 13.

11.*Макаров А.Н., Шимко М.Б., Острик В.В*. Анализ основных технико–экономических показателей работы дуговых печей постоянного и переменного тока // Электрометаллургия. – 2004. – № 3. – С. 5 – 9.

12.*Окороков Г.Н.* Дуговые печи постоянного тока // Новости черной металлургии за рубежом. – 1995. – № 1. – С. 48 – 54.

13.*Еланский Д.Г., Еланский Г.Н*. Тенденции развития технологии и оборудования электросталеплавильного производства // Тр. VI конгресса

сталеплавильщиков. г. Череповец, 17 – 19 октября 2000 г. Ассоциация сталеплавильщиков. – М.: ОАО «Черметинформация». – 2001. – С. 188 – 197.

14. *Смирнов А.Н., Панфилов Т.С., Норова Е.Г.* Снижение энергоемкости электросталеплавильного производства в Украине как фактор повышения конкурентоспособности металлопродукции // Тр. VI конгресса сталеплавильщиков. г. Череповец, 17 – 19 октября 2000 г. Ассоциация сталеплавильщиков. – М.: ОАО «Черметинформация». – 2001. – С. 197 – 206.

15. *Агрегат* ковш – печь емкостью 15 т для внепечной обработки стали / Н.И. Воробьев, И.Ю. Зинуров, А.П. Щетинин и др. // Электрометаллургия. – 2003. – № 1. – С. 9 – 13.

16. *Проектирование* и оборудование электросталеплавильных и ферросплавных цехов; Учебник / В.А. Гладких, М.И. Гасик, А.Н. Овчарук и др. – Днепропетровск: Системные технологии, 2004. – 736 с.

17. *Теплообмен* в дуговых сталеплавильных печах: Учебное пособие/ А.Н. Макаров, Тверь: ТГТУ, 1998. – 184с.

18. *Макаров А.Н., Макаров Р.А.* Теплоотдача электрических дуг в плазменно–дуговых и дуговых сталеплавильных печах трехфазного и постоянного токов // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1999. – № 6. – С. 16 – 19.

19. *Макаров А.Н., Макаров Р.А., Зуйков Р.М.* Определение коэффициента полезного действия дуг дуговых сталеплавильных печей трехфазного и постоянного токов // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2001. – № 2. – С. 12 – 17.

20. *Макаров А.Н.* Аналитические и экспериментальные исследования теплообмена и электрических режимов дуговых сталеплавильных печей // Электрометаллургия. – 2002. – № 5. – С. 38 – 45.

21. *Макаров А.Н., Шимко М.Б.* Влияние КПД дуг на потребление электроэнергии дуговыми сталеплавильными печами постоянного и трехфазного токов // Электротехника. – 2002. – № 7. – С. 55 – 59.

22. *Ячиков И.М.* Интенсификация массопереноса в электропечах постоянного тока: Монография. – Магнитогорск: МГТУ, 2002. – 132с.

23. *Ячиков И.М. Миляев А.Ф., Портнова И.В.* Пути интенсификации массопереноса в ванне дуговых печей постоянного тока // Тр. V11 конгресса сталеплавильщиков. г.Магнитогорск, 15 – 17 октября 2002г.Ассоциация сталеплавильщиков. М.: ОАО «Черметинформация».– 2003. – С 357 – 358

24. *Ячиков И.М., Портнова И.В.* Моделирование электромагнитных процессов, протекающих в ванне расплава ДППТ. Сообщение 1// Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2005. – №7. – С. 27 – 29.

Статья рекомендована к печати к.т.н. В.П.Корченко