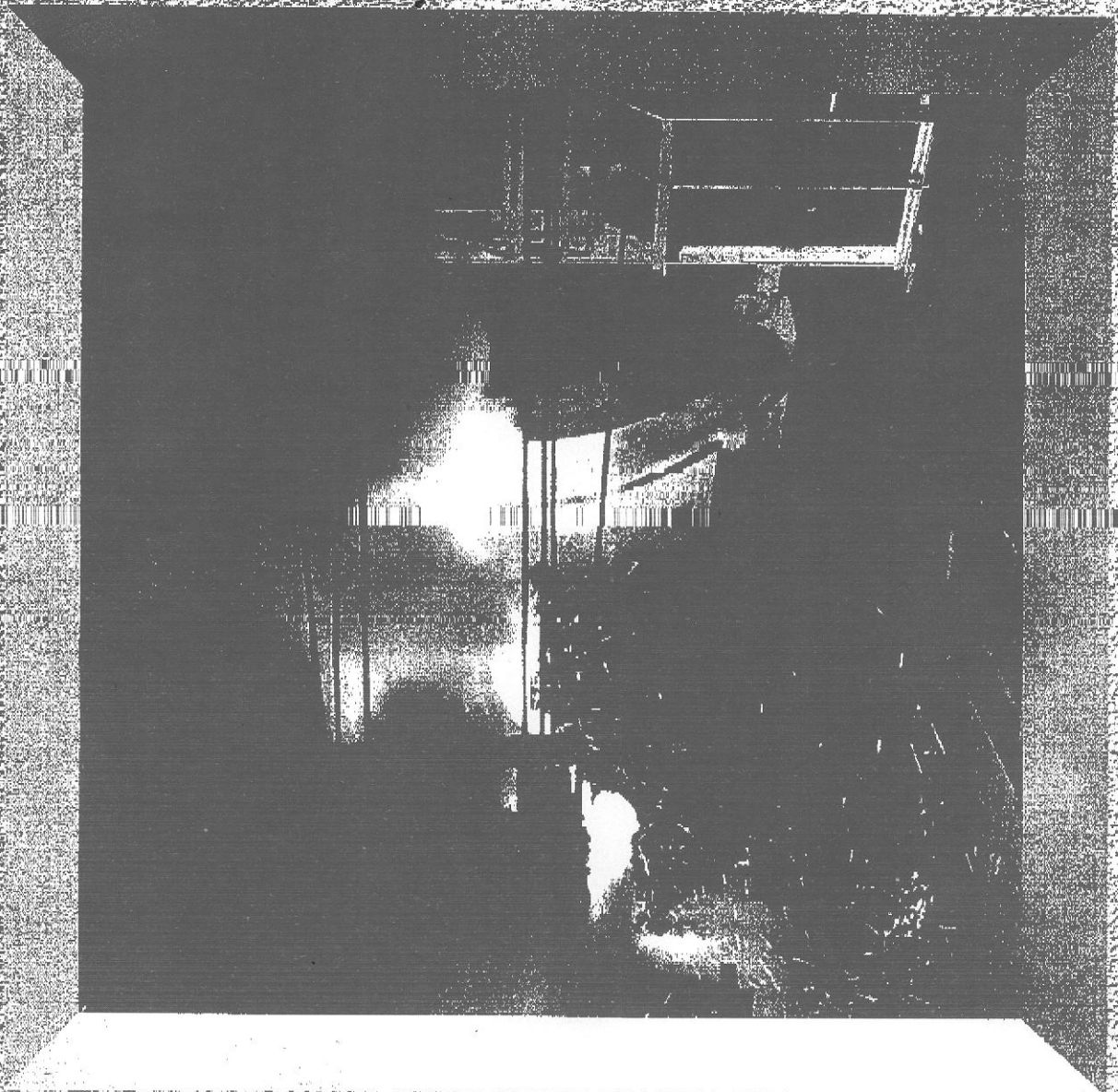


ISSN 1067-5781

ЭлектроМеталлургия

Ежемесячный
научно-технический,
производственный
и учебно-методический
журнал

9/2009



К вопросу о рациональной технологии выплавки стали в дуговых печах постоянного тока

Ю. А. Гудим, И. Ю. Зинуров, А. М. Шумаков

НТ ЗАО "Аконт"

В статье приводится сопоставление в части технологии трехфазных дуговых печей и печей постоянного тока. Высказана другая точка зрения по этому вопросу. Отмечается, что заявленные в ряде публикаций преимущества печей постоянного тока не всегда подтверждаются на практике, приведены примеры.

Ключевые слова: трехфазные дуговые печи, печи постоянного тока, техническое производство.

Как утверждается в работе [1], вполне вероятно, что в ближайшем будущем продолжится "соревнование" дуговых печей постоянного и переменного тока. Мы — авторы настоящей статьи — свое мнение по этому вопросу высказали ранее [2]. Вернуться снова к данной теме нас побудили публикуемые в отечественных научно-технических изданиях сообщения о преимуществах ДСППТ нового поколения по сравнению с ДСП, возможности и необходимости использования в ДСППТ принципиально новой технологии плавки, не базирующейся на общеизвестных и проверенных на практике положениях физики, физической химии, теории и технологии производства стали [3—7 и др.]. Особенно настораживают рекомендации по созданию высокопроизводительных комплексов ДСППТ — МНЛЗ, работающих на принципиально отличающейся от общепринятой технологии и обеспечивающих высокое качество металла и синхронизацию работы ДСППТ и МНЛЗ без внепечной обработки в агрегатах ковш-печь [4—7].

В настоящей статье приведен анализ наиболее спорных, по нашему мнению, положений "новой" технологии.

Целесообразность подготовки шихты к плавке и влияние конструктивных особенностей ДСППТ на процесс плавления шихты

В указанных публикациях [3—7], докладах на научно-технических конференциях утверждается, что печи, в которых работают ДСППТ, не нуждаются в отделениях подготовки шихты, так как электромагнитные силы, возникающие в ванне ДСППТ, вызывают интенсивное перемешивание жидкого металла, позволяющее быстро расплавить любой лом, включая крупный и негабаритный. Однако, авторы этих публикаций ничего внятного не сообщают ни о мощности перемешивания, ни о направлении движения металла в таком случае, особенно в период плавления.

Наличие электромагнитных сил, вызывающих движение металла в ванне ДСППТ, подтверждено результатами ряда исследований [8, 9], но и эти исследования не содержат конкретных данных о мощности перемешивания металлического расплава. В то же время в зарубежных публикациях по результатам промышленных исследований процесса плавки в ДСППТ не отмечено существенного влияния электромагнитных сил на процесс плавления шихты и физико-химические процессы по ходу плавки стали.

Если бы в ДСППТ мощность электромагнитного перемешивания даже была достаточно велика, то это никак не повлияло бы на время проплавления колодца в ломе в начале плавления, практически не повлияло бы и на длительность наплавления жидкой ванны, лишь немного уменьшило бы время, затрачи-



ваемое на доплавление шихты, расположенной на откосах у стен печи. Загрузка всей извести, необходимой для формирования шлака на всю плавку вместе с ломом в период завалки, еще больше затруднит расплавление шихты. Поэтому говорить о существенном сокращении длительности плавления в ДСППТ и возможности эффективной работы такой печи на неподготовленном ломе не имеет смысла. Опыт мировой электрометаллургии стали свидетельствует о существенном улучшении показателей электроплавки при работе на подготовленном ломе, независимо от того, на каком (переменном или постоянном) токе работает электропечь.

*Целесообразность и способы окисления
углерода шихтовых материалов.
Количество газов, выделяющихся
из рабочего пространства ДСППТ*

Утверждается, что в ДСППТ вообще нет необходимости окислять углерод шихты, а если такая необходимость возникает, то для этого целесообразно применять железорудные материалы (руда, окатыши), проводя рудное кипение. Это позволит якобы резко уменьшить количество образующихся печных газов и обойтись без газоочистных устройств для ДСППТ любой емкости [7].

На самом деле это опасное заблуждение. Среднее содержание углерода в ломе 0,35 %. При выплавке конструкционной стали большей части марок содержание углерода в расплаве в конце окислительного периода плавки необходимо снижать до 0,15—0,18 %, чтобы обеспечить возможность использования более дешевых углеродистых ферросплавов для легирования и раскисления стали. Кроме того, рядовой несортированный лом обычно содержит до 2 % органического мусора, который вместе с ломом попадает в печь и там должен чем-то окисляться. При расходе электродов 1,2—1,4 кг/т это количество графита также окисляется, причем главным образом в рабочем пространстве печи. Если поверить утверждениям о том, что в рабочее пространство ДСППТ практически не подсасывается воздух и атмосфера в печи восстановительная, то

примерно 18—19 кг органики на тонну стали (15 кг мусор + 2 кг углерод лома + 1,5 кг углерод электродов) приходится окислять, используя оксиды железа руды или окатышей. Несложный расчет показывает, что при этом образуется CO 21 м³/т металла. При средней температуре рабочего пространства 1500 °С объем горячего монооксида углерода составит не менее 136 м³/т стали. Для 100-т печи это уже составит 13600 м³/ч CO при производительности 100 т/ч, или 6800 м³/ч CO при производительности 50 т/ч. Так как содержание CO в печной атмосфере составляет примерно 30 %, то из ДСППТ емкостью 100 т выделяется не менее 30000—45000 м³/ч горячего печного газа с высоким содержанием CO . Это существенно отличается от заявленных 200—300 м³/ч на три печи емкостью по 100 т [7]. Если учесть необходимость дожигания CO или разбавления CO в отходящих печных газах, то мощность газоочистки должна быть еще больше.

Расчетное количество Fe_2O_3 , необходимое для окисления углерода лома, электродной массы и органики мусора, попавшего в печь вместе с ломом, составит 50 кг/т металла при полном отсутствии подсоса воздуха в ДСППТ, что маловероятно. Реально в связи с подсосом воздуха Fe_2O_3 из руды потребуется 33—42 кг/т. В перерасчете на хорошую руду (60 % Fe_2O_3) ее необходимо 55—70 кг/т. Бедной руды потребуется гораздо больше. Так как в печи с основной футеровкой основность шлака (CaO/SiO_2) должна быть не менее 2 (это нужно и для дефосфорации металла), в печь надо будет добавить извести не менее 25—30 кг/т. С учетом оксидов, образовавшихся при окислении марганца и кремния лома, суммарное количество шлака в ДСППТ, работающей без применения газообразного кислорода, составит не менее 7—8 % массы металла. Эта цифра почти не отличается от данных по количеству окислительного шлака в старых маломощных и не очень хорошо герметизированных ДСП переменного тока. Так что разговоры о возможности работы ДСППТ

с небольшим количеством "хорошего" шлака беспочвенны.

И совсем уже некомпетентным кажется предложение использовать для обезуглероживания чугуна и получения стали рудное кипение в дуговых миксерах постоянного тока [7]. История металлургии знала так называемый рудный мартеновский процесс, появившийся и почти сразу же исчезнувший в конце 19-го века из-за очень больших затрат энергии на плавку и большого количества шлака по ходу процесса. Применительно к предлагаемому процессу в дуговом миксере количество шлака может составить 50–60 % к массе металла, а расход богатой руды (60 % Fe_2O_3) — не менее 330–335 кг/т металла. Энергетически такой процесс будет крайне невыгодным, так как потребуются энергия на плавление и нагрев руды и извести, а также на нагрев металла с 1250 °С до температуры порядка 1600 °С. Кроме того, потери металла со шлаком в виде корольков, не успевших осесть в металлический расплав, скрапа и оксидов железа могут быть на уровне ожидаемого пригара металла. Неясно также, куда девать такое огромное количество шлака, в 3,5–4 раза превышающее количество шлака, получаемого в конвертере. Кстати, электромагнитное перемешивание в таком миксере практически не повлияет на ход процесса, так как мощность перемешивания металлического расплава пузырьками СО, выделяющегося в процессе окисления углерода чугуна, значительно выше, чем мощность электромагнитного перемешивания.

Особенности дефосфорации металла в ДСППТ

Процесс дефосфорации металла в ДСППТ не должен ничем отличаться от процесса дефосфорации в ДСП. Следует лишь обратить внимание на общеизвестные положения о том, что для хорошей дефосфорации расплава в сталеплавильной печи необходимо иметь достаточное количество жидкоподвижного перемещаемого шлака с основностью не менее 2, содержанием оксидов железа не менее 10 % и предварительно окислить содержащиеся в металле элементы, препятствующие

окислению фосфора, — углерод, марганец, кремний, хром. Так как дефосфорация металла обычно совмещается с окислением углерода, перемешивание ванны металла и шлака пузырьками монооксида углерода обеспечивает достаточно большую поверхность контакта металл–шлак и высокую скорость дефосфорации металла, электромагнитное перемешивание металла не может существенно улучшить протекание процесса дефосфорации. Пропагандируемая возможность работы ДСППТ с небольшим количеством "хорошего" шлака не обеспечит нужной степени дефосфорации металла.

Дегазация металла и поведение газов в металле по ходу плавки стали в ДСППТ

Утверждается [4, 7], что "новая" технология плавки стали обеспечивает "глубокое удаление газов" из металла. Механизм и практика дегазации больших масс металла достаточно хорошо изучены [10 и др.]. Из всех известных способов дегазации металла в дуговых печах как переменного, так и постоянного тока удаление газов, растворенных в стали, реально может осуществляться только пузырьками монооксида углерода, образующимися при окислении углерода расплава. Пропагандируемая идея ведения плавки стали в ДСППТ с незначительным окислением углерода или вообще без окисления углерода шихты при ее реализации на практике не обеспечит возможности осуществления заметной дегазации металла. Электромагнитное перемешивание расплава, из которого не выделяются и не всплывают пузырьки СО, не может осуществить дегазацию металла. Следует помнить, что в любой дуговой печи в течение всей плавки существует поток газов из печной атмосферы в металлический расплав. Эффективность дегазации металла в течение плавки определяется разностью между количеством удаленного из металла газа и количеством поступившего в металл газа из печной атмосферы и добавочных материалов (шлакообразующих, легирующих, раскислителей). Поэтому классическая технология плавки в ДСП, которую, усовершенствовав, хотят использовать в ДСППТ, предусматривает обязательное окисление

большого количества углерода (0,3—0,4 %) с достаточно большой скоростью. Так как "новая" технология плавки стали в ДСППТ предусматривает еще и отказ от какой-либо внепечной обработки металла, получение качественного металла с низким содержанием газов при ее использовании невозможно. Это может не иметь слишком большого значения в литейном производстве при использовании влажных "земляных" форм, когда содержание водорода в готовой отливке определяется, прежде всего, влажностью формы. Но при массовом производстве стали для проката, разливаемой на МНЛЗ, высокое содержание газов в металле крайне нежелательно.

Поведение неметаллических включений в стали при выплавке в ДСППТ

Сообщается о "глубоком удалении неметаллических включений из расплава" в ДСППТ под воздействием электромагнитного перемешивания [7]. Многостадийный процесс удаления неметаллических включений из металла достаточно хорошо изучен [10, 11]. Электромагнитное перемешивание ускоряет протекание лишь одной стадии такого процесса — доставки включений из металлической ванны на границу раздела металл — фаза, поглощающая и ассимилирующая включения (в данном случае — печной шлак). Кроме того, при слишком интенсивном перемешивании возможно и протекание обратного процесса — увлечения включений вглубь металлической ванны. А самым главным является вопрос: какие включения по ходу плавки удаляются с помощью электромагнитного перемешивания? Если это включения, присутствовавшие в леме, то они действительно могут почти полностью удалиться из расплава. Но в этом нет никакого преимущества ДСППТ. Известно, что и в печах переменного тока в окислительный период плавки при интенсивном кипении ванны в результате окисления углерода включения, содержащиеся в шихте, также практически полностью удаляются из расплава.

На качество готового металла решающее влияние оказывают эндогенные продукты раскисления стали и экзогенные включения

шлака, попадающие в сталь во время выпуска металла вместе со шлаком. Так как раскисление металла проводится в ДСППТ или в печи перед выпуском плавки, или в ковше во время или по окончании выпуска, электромагнитное перемешивание в печи не может оказать сколько-нибудь заметного влияния на количество, размер и природу таких включений. Поэтому так называемая "новая", а на самом деле старая "классическая" технология не имеет никаких преимуществ перед современной технологией плавки в индукционных печах с перемешиванием металла в вопросе получения качественного металла с низкой загрязненностью неметаллическими включениями, но зато существенно уступает в производительности.

О десульфурации металла при выплавке стали в ДСППТ. Какой процесс необходим: одно- или двухшлаковый?

Предлагаемая "новая" технология плавки для ДСППТ, в том числе и для печей большой емкости, предусматривает проведение десульфурации металла в печи и отказ от любой внепечной обработки металла, включая обработку печным шлаком во время выпуска. Для успешной десульфурации металла необходимо выполнение хотя бы трех условий: наличие раскисленного металла, наличие основного хорошо раскисленного ($\text{FeO} \leq 1,0 \%$) перемешиваемого жидкоподвижного шлака, достаточно большая поверхность контакта металла и шлака. Поэтому для "новой" технологии главным является вопрос: "Процесс плавки должен быть одношлаковым или двухшлаковым?". Если применять одношлаковый процесс, то шлак окислительного периода с высоким содержанием оксидов железа ($\geq 10 \%$, необходимого для окисления углерода и дефосфорации металла) надо будет раскислить, чтобы обеспечить возможность достаточной десульфурации металла. Но при этом неизбежен процесс рефосфорации металла и, соответственно, увеличение содержания фосфора в стали. Раскислить окислительный шлак довольно трудно, особенно в печи большой емкости, электромагнитное перемешивание ванны этому не поможет. Длительность плавки в таком случае

существенно увеличится, печной шлак будет вязким из-за высокого содержания оксидов магния; необходимая степень десульфурации металла вряд ли будет достигнута [12, 13]. Если же применять двухшлаковый процесс, то потребуется шлак окислительного периода плавки из печи скачивать и наводить новый для проведения восстановительного периода. До настоящего времени операцию скачивания шлака из печи не удалось механизировать и ее осуществляют вручную через открытое рабочее окно. В печи большой емкости это очень трудоемкий и длительный процесс. Кроме того, эта операция приводит к значительным потерям металла вместе со скачиваемым шлаком и большим подсосам воздуха в печь. Целесообразность десульфурации металла в печи, в том числе и в ДСППТ, вызывает большие сомнения. Гораздо проще вести плавку по общепринятой современной технологии, а десульфурацию осуществлять в ковше.

Легирование металла и усвоение легирующих

Сообщается об очень высоком усвоении легирующих при плавке стали в ДСППТ по "новой" технологии под воздействием электромагнитного перемешивания и восстановительной атмосферы [4, 7].

Как известно, усвоение легирующих элементов зависит прежде всего от следующих факторов: окисленности металла, состава и окисленности шлака, характера выпуска плавки (слив металла со шлаком или без него). Нами было показано, что наличие восстановительной атмосферы при плавке по рекламируемой "новой" технологии в ДСППТ, особенно большой емкости, маловероятно. Электромагнитное перемешивание металла несколько ускоряет плавление и растворение легирующих в стали, но не влияет на окисленность шлака и металла. Поэтому при одношлаковом процессе плавки усвоение легирующих будет прежде всего зависеть от состава и окисленности печного шлака, а также от типа выпуска плавки [12, 13]. Следует отметить, что предлагаемая конструкция ДСППТ реально может обеспечить только слив металла по желобу вместе со шлаком. В таком случае вряд ли можно обеспечить высокое усвоение леги-

рующих. Если же будет применяться двухшлаковый процесс, то усвоение легирующих, присаженных в печь, будет выше, но не превысит показателей, характерных для старых печей большой металлургии, работавших двухшлаковым процессом по классической технологии. Усвоение легирующих, вводимых в металл в агрегате ковш-печь, будет однозначно выше, чем в ДСППТ.

Расход энергии на плавку в ДСППТ

Декларируется крайне низкий удельный расход электроэнергии на расплавление шихты в ДСППТ — 410 кВт·ч/т без использования каких-либо альтернативных источников энергии во время плавки [7]. Эта цифра нереальна. Результаты многочисленных балансовых плавов в различных сталеплавильных агрегатах [14–16] показывают практически одни и те же значения теплосодержания сливаемой стали 380–385 кВт·ч/т и шлака (приходящегося на 1 т стали) 38–55 кВт·ч, что составляет в сумме 418–440 кВт·ч/т стали. Это уже больше представленных 410 кВт·ч/т. Но ведь есть еще потери энергии: электрические потери; тепловые потери с охлаждающей водой порядка 50 кВт·ч/т стали, потери с отходящими газами и прочие. Мы показали, что количество отходящих из ДСППТ газов достаточно велико, и потери с отходящими газами будут достаточно большими. В связи с малой стойкостью кирпичной футеровки ДСППТ большой емкости должна иметь водоохлаждаемые панели стен и свода, а также водяное охлаждение подового электрода, что определяет высокие потери энергии с охлаждающей водой.

Поэтому рекламируемая величина расхода энергии очень далека от реальной. Подтверждением этого могут быть данные о работе ДСППТ на заводе "Электросталь" [5].

Потери металла, экономика процесса производства стали, экологические проблемы и Киотский протокол

Действительно, при выплавке стали без применения кислорода потери железа в процессе плавки меньше, чем на плавках с применением кислорода большого объема. Но это характерно для печей как постоянного,

ПРОИЗВОДСТВО ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ



так и переменного тока. При плавке без использования кислорода в ДСП малой удельной мощности потери металла составляли 5–6 %. Примерно на таком же уровне должны быть потери металла в ДСППТ без использования кислорода. Потери металла в таком случае определяются количеством лома, испарением железа в зоне дуг, химическим составом лома и потерями железа со шлаком, в котором металл находится в виде мелких скрапин и корольков и не зависит практически от типа дуговой печи. Большие потери железа в сверхмощных печах при интенсивном применении газообразного кислорода в какой-то степени компенсируются заметным увеличением производительности ДСП и соответствующим снижением расходов по переделу.

Низкую производительность ДСППТ, работающих без использования кислорода, предлагается компенсировать увеличением количества печей. Например, вместо одной сверхмощной ДСП емкостью 100 т и одного агрегата ковш-печь использовать три ДСППТ средней мощности и такой же емкости. Нами показана необходимость строительства для такого цеха отделения подготовки лома и достаточно мощной газоочистки.

Понятно, что строительство цеха с несколькими ДСППТ большой емкости в таком случае потребует больших капитальных вложений, чем сооружение цеха с одной сверхмощной ДСП и АКП, несмотря на необходимость дополнительных затрат на кислородную станцию. Вполне естественно, что в цехе с несколькими ДСППТ эксплуатационные затраты также будут выше, а число работающих больше, чем в цехе с одной ДСП и одним АКП, соответственно, выше будет и себестоимость выплавленной стали.

Было бы большим заблуждением считать, что ДСППТ, работающие по предлагаемой "новой" технологии без использования топливокислородных горелок и окисления кислородом значительного количества углерода для ускорения расплавления шихты, в конечном итоге выделяют меньше парникового газа CO_2 , чем ДСП, работающие по общепринятой технологии с использованием альтернативных

источников энергии, и дают возможность получать льготы по Киотскому протоколу. Лучшие тепловые электростанции, снабжающие электросталеплавильные цехи энергией, имеют суммарный тепловой КПД порядка 35 %. КПД топливокислородных горелок сверхмощных ДСП равен 50 %; степень усвоения тепла от окисления углерода в ванне ДСП также около 50 % с учетом дожигания части CO в рабочем пространстве печи. При одинаковом удельном расходе энергии, с учетом сказанного, ДСППТ, использующая только электроэнергию, вызывает большее загрязнение атмосферы парниковым газом, чем ДСП, использующая топливокислородные горелки.

По имеющимся данным, при работе 20-т печи постоянного тока в ОАО "Тяжпрессмаш" (г. Рязань) за 2008 г. количество непопадания в заданный химический состав составило: сталь — 26 % плавок, чутун — 59 %, что свидетельствует о неэффективности работы ДСППТ по качеству.

Из-за неудовлетворительного перемещения ванны в ДСППТ-12 так и не освоена выплавка высокопрочного чутуна в ОАО "Горьковский автомобильный завод". Такой чутун по-прежнему производят в индукционной печи.

Представленная как высшее достижение разработчиков 6-т печь постоянного тока Курганского машиностроительного завода, работе которой были посвящены более десятка публикаций [3, 18, 19 и др.], в 2008 г. реконструирована и переведена на переменный ток. По разным причинам выведены из эксплуатации ДСППТ в Ахмедабаде (Индия), в Набережных Челнах в ОАО "Камаз", в Тольятти в ОАО "Волгоцеммаш" и др.

Эти факты свидетельствуют часто о неоправданно завышенной оценке технологических преимуществ ДСППТ "нового поколения" перед печами переменного тока.

Заключение

Основные положения "новой" технологии плавки стали в ДСППТ нового поколения лишь вводят в заблуждение недостаточно подготовленных специалистов, а в действительности она мало чем отличается от старой

"классической" технологии плавки, использовавшейся в середине 20-го века в маломощных в то время ДСП переменного тока, а ее использование в малых и средних печах для выплавки качественной стали не дает каких-либо заметных выгод (технологических или экономических) по сравнению с применяющейся современной технологией плавки. Следует также учитывать, что капитальные затраты, как указывалось в работе [2], при строительстве ДСППТ на 35 % больше, чем для печей переменного тока.

Рекламируемая "новая" технология не может обеспечить производство металла с достаточно низким содержанием серы, необходимым для получения качественных непрерывнолитых заготовок стали. В то же время опыт работы отечественных МНЛЗ свидетельствует о четкой зависимости степени развития ряда дефектов заготовок от содержания серы [17].

Использование предлагаемой технологии в ДСППТ большой емкости, так же как и создание комплексов нескольких ДСППТ — МНЛЗ, работающих по такой технологии, не рационально, экономически невыгодно и сложно в реализации.

В случае применения ДСППТ большой емкости эффективней использовать традиционную современную технологию плавки, применять альтернативные источники тепла, а металл рафинировать вне печи преимущественно в агрегатах ковш-печь. Результаты работы зарубежных ДСППТ подтверждают это.

Список литературы

1. Кудрин В. А. Теория и технология производства стали. М.: "Мир", 2003. 526 с.
2. Зинуров И. Ю., Гудим Ю. А., Галин В. С., Шумаков А. М. Дуговые печи постоянного тока в современном электрошлаковом производстве // Электрометаллургия. 2005. № 10. С. 3—12.
3. Афанаскин А. В., Андреев И. Д., Малиновский В. С. и др. Результаты первого этапа освоения дугового сталеплавильного агрегата постоянного тока нового поколения на

ОАО "Курганмашзавод" // Литейное производство. 2000. № 11.

4. Малиновский В. С. Техничко-экономические результаты промышленного освоения дуговых печей постоянного тока нового поколения // Металлургия машиностроения. 2004. № 6. С. 9—23.

5. Попов В. Н., Кривенков Н. А. Дуговая печь постоянного тока нового поколения на ОАО "Металлургический завод Электросталь". // Литейное производство. 2005. № 7. С. 20—21.

6. Володин А. М., Сорокин В. А., Богдановский А. С. и др. Выплавка стали в дуговой печи после перевода питания с переменного тока на постоянный // Литейное производство. 2005. № 7. С. 21—22.

7. Малиновский В. С., Власова И. Б. Инновационные технологии и оборудование дуговых печей и миксеров постоянного тока нового поколения // Сталь. 2009. № 3. С. 82—83.

8. Боярнич В. В., Фрейберг Я. Ж., Шялова Е. И., Шербин Э. В. Электровишневые тиснения. Рига: Зинатне, 1985. 315 с.

9. Ячников И. М., Колокольцев В. М., Портнов И. В. Электромагнитные силы в ванне дуговой печи постоянного тока // ОАО "Черметинформация" Бюлл. "Черная металлургия". 2007. № 8. С. 25—58.

10. Кюшнел Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. М.: Металлургия. 1984. 412 с.

11. Григорьев В. А., Беличиков Л. Н., Стомакин А. Я. Теоретические основы электрошлакоплавильных процессов. М.: Металлургия, 1987. 271 с.

12. Поволоцкий Д. Я., Гудим Ю. А. Выплавка легированной стали в дуговых печах. М.: Металлургия. 1987. 136 с.

13. Поволоцкий Д. Я., Гудим Ю. А., Зинуров И. Ю. Устойчивость и работа сверхмощных дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия, 1990. 174 с.

14. Маки Т. Перспектива электрошлаковом производстве в Японии // Новости черной металлургии за рубежом. 2001. № 2. С. 57—58.

15. Деревяченко И. В., Лозин Г. А., Шумахер Э. Г. Совершенствование условий энергообеспечения современного электрошлаковом процессе // Сталь. № 1. С. 45—50.

16. Гудим Ю. А., Зинуров И. Ю., Киселев А. Д. и др. Рациональные способы интенсификации плавки в современных дуговых сталеплавильных печах // Электрометаллургия. 2005. № 9. С. 2—6.

17. Ботинков С. А., Мурзин И. С., Подкорытов А. Л. Влияние химического состава стали и технологических параметров непрерывной разливки на образование и развитие дефектов формы и макроструктуры заготовки // Сталь. 2006. № 5. С. 35.

18. Малиновский В. С., Ярних Л. В., Афанаскин А. В. Новое поколение дуговых печей постоянного тока для металлургического и литейного производства. Труды VII Конгресса сталеплавильщиков, 15—17 октября 2002 г., Магнитогорск.

19. Малиновский В. С., Ярних Л. В. Дуговые печи постоянного тока нового поколения для металлургии машиностроения // Металлургия машиностроения. 2002. № 1.