

ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛАВКИ СТАЛИ В ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ И ПЕРЕВОД ДСП НА РАБОТУ С ВОДООХЛАЖДАЕМЫМ СВОДОМ КОНСТРУКЦИИ МГВМИ

О.М. Сосонкин¹, М.В. Шишимиров²

¹ Московский государственный вечерний металлургический институт, г. Москва;

² Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, г. Москва

Показана необходимость и возможность замены кирпичной кладки водоохлаждаемыми элементами при возрастании вводимой в дуговую сталеплавильную печь мощности. Такая замена приводит к некоторому увеличению удельного расхода электроэнергии, в основном за счёт возрастания потерь в окислительный и восстановительный периоды плавки, что компенсируется снижением простоев печи на замену кирпичных сводов. С увеличением производительности печи удельный расход электроэнергии уменьшается. Тепловые потери могут быть дополнительно снижены экранированием свода путём подачи в печь углеродсодержащих газов. Рассмотрены пути достижения максимальной эффективности печей с водоохлаждаемым сводом путем повышения производительности и изменения соотношений геометрических параметров ДСП. Водоохлаждаемый свод конструкции Московского государственного вечернего металлургического института находился в эксплуатации на ДСП вместимостью от 1,5 до 200 т включительно, а в 2004–2005 гг. введены в эксплуатацию ДСП вместимостью 175 и 320 т. Достигнуты показатели по производительности 230 и 320 т/ч при удельном расходе электроэнергии 290 и 359 кВт·ч/т.

Ключевые слова: печь; свод; дуга; производительность; потери; газ; кислород.

Конструкции дуговых сталеплавильных печей (ДСП) и технологии выплавки стали в них непрерывно совершенствуются.

До середины прошлого века ДСП рассматривалась как агрегат для выплавки высококачественных и высоколегированных сталей. По мере роста вводимой в печь электрической мощности и вместимости печей, использования кислорода и альтернативных источников энергии ДСП рационально использовать как агрегат для расплавления шихты и получения полупродукта для последующей обработки вне печи [1].

Увеличение вводимой в печь мощности создало проблему стойкости огнеупорной кладки. Наиболее уязвимой частью кладки существовавших ДСП являлся свод ввиду больших тепловых и механических нагрузок, связанных с распорными усилиями в арочной конструкции и неравномерностью износа отдельных участков поверхности. Попытки увеличить стойкость свода за счет использования более качественных огнеупоров не давали нужного эффекта. Применение, например, плавящихся огнеупоров увеличивало стойкость на 20–25 % при увеличении стоимости этих огнеупоров в 1,5–2 раза.

Радикальным способом решения проблемы стойкости свода ДСП явилась замена огнеупоров водоохлаждаемой конструкцией.

Научно-исследовательские работы в указанном направлении проводились в Московском го-

сударственном вечернем металлургическом институте (МГВМИ) под руководством профессора Н.А. Барина (1902–1967).

В начале этих работ экономическая эффективность замены кладки ДСП водоохлаждаемыми элементами была сомнительной. Кроме того, психологический барьер соседства воды и расплавленного металла был высок до такой степени, что его преодоление потребовало многих лет и усилий.

Впервые водоохлаждаемый свод на ДСП-1,5 Красногорского завода цементного машиностроения (КЗЦМ) (рис. 1) был установлен в 1959 г. [2].

В 1968 г. на этой печи была проведена серия опытных плавов с водоохлаждаемыми сводом и стенами [3].

Проведенный эксперимент показал принципиальную возможность проведения плавки при интенсивном отборе тепла из рабочего пространства ДСП даже при низкой величине вводимой в печь мощности 250 кВт·А/т. Психологический барьер проведенным экспериментом был снижен, но не преодолен, так как условия плавки в печи литейного цеха существенно отличаются от условий электросталеплавильного цеха черной металлургии.

Учитывая полученные результаты, Минчермет поручил провести комплекс работ совместно МГВМИ и Красноярскому металлургическому заводу «Сибэлектросталь» на ДСП-10 с водоохлаждаемым сводом. На печах этого завода вводимая

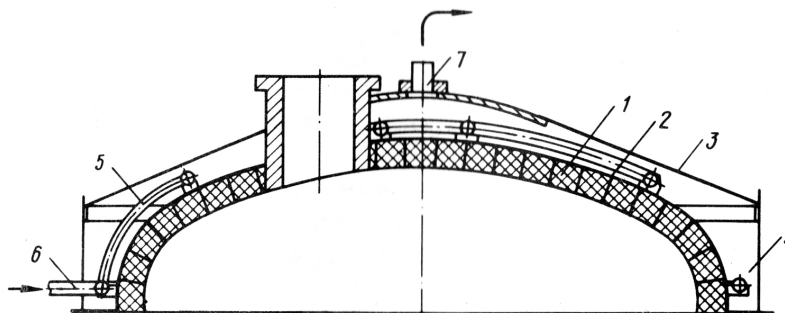


Рис. 1. Арочный водоохлаждаемый свод ДСП-1,5

Рис. 2. Конструкция водоохлаждаемого свода ДСП-10
завода «Сибэлектросталь»

в печь мощность составляла 500 кВ·А/т и использовался кислород для продувки ванны.

Сотрудниками МГВМИ вместе с работниками проектного отдела завода был спроектирован плоский водоохлаждаемый свод для ДСП-10 цеха бескоксовой металлургии (рис. 2).

Водоохлаждаемый свод был установлен на печь в ноябре 1969 г. Результаты многолетней эксплуатации свода на ДСП-10 завода «Сибэлектросталь» сняли психологический барьер, что подтвердилось в дальнейшем распространением такого способа решения проблемы стойкости элементов кладки на ДСП различной вместимости [4].

При проведении плавки на ДСП-10 цеха бескоксовой металлургии измеряли расход воды на охлаждение свода, перепад температур воды на выходе и входе. Это позволило определять тепловую нагрузку и мощность тепловых потерь с охлаждающей водой ($\text{кВт}/\text{м}^2$) в любой момент времени.

В 1971 году водоохлаждаемый свод был установлен на ДСП-10 ЭСПЦ того же завода. Широкий сортамент выплавляемых марок сталей соответствовал требованиям медицинской, авиационной и других отраслей хозяйства. Психологический барьер соседства воды и расплавленного металла был преодолен окончательно. Доказана возможность получения широкого сортамента сталей в ДСП при интенсивном отборе тепла из рабочего пространства.

Вместе с тем, экономическая эффективность внедрения водоохлаждаемого свода была сомнительной. Так, удельный расход электроэнергии при выплавке стали в ДСП-10 с кирпичным сводом составлял $680 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$, а с водоохлаждаемым – $746 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$. Разница этих величин складывается из $6 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$ в период плавления, $20 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$ в окислительный и $40 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$ – в восстановительный период плавки. Очевидно, что львиная доля потерь приходится на окислительный и восстановительный периоды плавки. Следовательно, сокращение

длительности жидких периодов плавки является основным путем снижения энергетических затрат. Потери тепла в жидкие периоды плавки компенсируются введением дополнительной мощности, которая в эти периоды обычно составляет 50–70 % от полной мощности трансформатора. Потери тепла в период плавления не могут быть восполнены, что может привести к увеличению длительности плавки. Возможное снижение производительности с лишней компенсируется снижением простоев печи на замену кирпичных сводов [5].

С увеличением производительности печи уменьшается удельный расход электроэнергии. Так, в 1970 году удельный расход электроэнергии на ДСП-10 завода «Сибэлектросталь» (последний год работы с кирпичным сводом) составлял $680 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$ при годовом производстве 30 тыс. т. В первый год эксплуатации печи с водоохлаждаемым сводом производство составило 30,5 тыс. т, а удельный расход электроэнергии – $746 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$. Далее производство росло в соответствии с планом, а удельный расход электроэнергии снижался и составил в 1980 г. $720 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$.

На рис. 3 и 4 показаны изменения тепловых потерь в течение нескольких кампаний кирпичного и одной – водоохлаждаемого для ДСП-10 и ДСП-100. Заштрихованные области характеризуют дополнительные потери тепла, связанные с заменой кирпичного свода водоохлаждаемым. Повышение стойкости кирпичного свода, как показано пунктиром, приводит к уменьшению заштрихованных площадей. Следовательно, при высокой стойкости кирпичного свода различие энергетических затрат по сравнению с водоохлаждаемым сводом уменьшается.

Тепловые потери с единицы охлаждаемой площади сталеплавильного агрегата не зависят от вместимости, так как температура жидкой стали не изменяется при любом способе введения мощности (дуга, факел, продувка кислородом). Поэтому

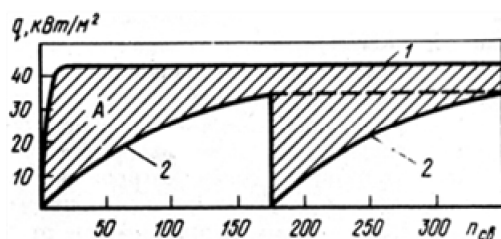


Рис. 3. Тепловые потери через водоохлаждаемый (1) и кирпичный (2) своды ДСП-10

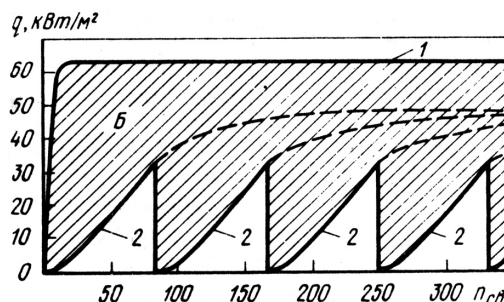


Рис. 4. Тепловые потери через водоохлаждаемый (1) и кирпичный (2) своды ДСП-100

относительная величина энергетических затрат на тонну стали снижается с ростом производительности агрегата, который достигается и ростом мощности, вводимой в печь, и интенсивным использованием кислорода для продувки ванны, и выносом жидких периодов плавки из печи в установки по доводке металла. Потери тепла с охлаждающей водой зависят от температуры излучателя (дуга и поверхность ванны) и оптической плотности слоя газов в рабочем пространстве, которая характеризуется запыленностью за счет продуктов продувки ванны кислородом и паров железа и шлака, образующихся в зоне взаимодействия дуги с шихтой или расплавом.

Эффективность замены кладки печи водоохлаждаемыми элементами в значительной мере зависит от того, насколько удастся снизить тепловые потери через охлаждаемую поверхность и компенсировать отбор тепла. Анализ процессов теплообмена в ДСП, а также благоприятные условия (высокая температура и малоокислительная атмосфера рабочего пространства в восстановительный период плавки) для крекинга углеродсодержащих газов позволили предложить способ снижения тепловых потерь путем подачи газа.

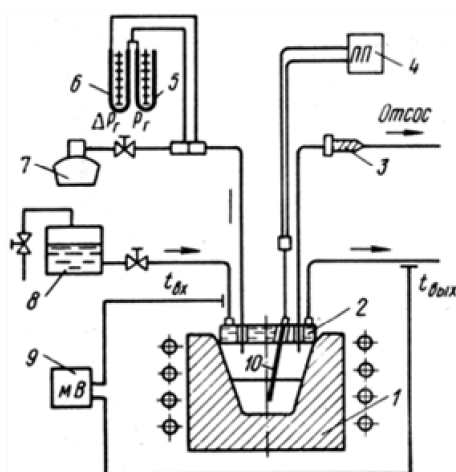


Рис. 5. Схема экспериментальной установки: 1 – индукционная печь; 2 – водоохлаждаемый свод; 3 – выносной фильтр; 4 – самопишущий потенциометр; 5 – U-образный манометр; 6 – микроманометр; 7 – баллон с газом; 8 – напорный сосуд; 9 – милливольтметр; 10 – термопара

Возможность снижения тепловых потерь через водоохлаждаемый свод в результате его экранирования продуктами разложения углеродсодержащего газа исследовали на лабораторной установке (рис. 5). Плавки проводили в 50-кг индукционной печи с плоским водоохлаждаемым сводом. В исследованиях использовали смесь газов (60 % пропана и 40 % бутана). Для определения концентрации сажистых частиц производили отсос газов через выносной фильтр [6].

Для анализа газов из рабочего пространства печи использовали хроматограф ХЛ-4. На опытных плавках в печь загружали 20–30 кг шихты, расплавляли ее и повышали температуру металла до 1450–1500 °С. Газ подавали в печь при установленном температурном режиме, когда тепловой поток на свод и температура металла были неизменны. На рис. 6 показано изменение теплового потока на водоохлаждаемый свод и температуры металла во времени.

Через 20–30 с от момента подачи газа тепловой поток через свод начинает резко падать, так как в течение начального периода происходит нагрев газа, а затем начинается его разложение с выделением сажи, что приводит к падению теплового потока. Концентрация сажистых частиц растет во времени и тепловой поток продолжает падать. Затем устанавливается равновесная концентрация сажи и тепловой поток стабилизируется.

Дальнейшее медленное снижение величины теплового потока происходит при постоянной концентрации сажи в объеме печи в результате увеличения толщины слоя сажи на поверхности водоохлаждаемого свода. Поскольку вводимая в печь мощность не изменялась, а потери через свод

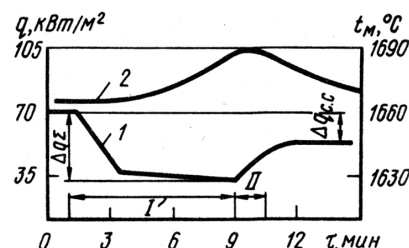


Рис. 6. Зависимость теплового потока q (1) и температуры металла t_m (2) от времени τ : I – подача газа; II – отсос газов

уменьшались, росла температура металла. На некоторых плавках температура металла повышалась на 20–25 °С.

После стабилизации теплового потока через свод отбирали пробы газов из рабочего пространства, затем включали отсос газов. По мере отсоса газов тепловой поток через свод увеличивался и температура металла снижалась. Через 2–3 мин после включения отсоса газов тепловой поток через свод и температура металла стабилизируются, причем установившиеся значения отличаются от первоначальных, так как из рабочего пространства удалены сажистые частицы, а слой сажи на поверхности свода остался.

В ДСП имеется возможность создать экранирующий слой газов толщиной 400–500 мм. При концентрации частиц сажи в этом слое 25 г/м³ тепловой поток на свод может быть снижен вдвое [7]. Указанный способ снижения тепловых потерь через водоохлаждаемый свод в большой степени может стать рациональным для небольших печей без принудительного отсоса газов из рабочего пространства печи.

При продувке ванны кислородом нами зафиксировано снижение теплового потока на свод при росте температуры металла.

Величина тепловых потерь с охлаждающей водой зависит от тепловой изоляции, которая наносится на тепловоспринимающую поверхность свода. Набивная масса, применяемая в конструкциях МГВМИ, состоит из хромомагнетитового порошка, огнеупорной глины, кремнефтористого натрия и жидкого стекла. В процессе эксплуатации пары металла проникают в поры набивного слоя, кристаллизуются, и нижний слой набивки перерождается в гарнисаж. Длительный опыт эксплуатации ДСП с водоохлаждаемыми сводами показал, что все способы удержания набивной массы на охлаждаемой поверхности заканчиваются толщиной 5–10 мм, а зачастую и полным отсутствием теплоизолирующего слоя. Если при этом учесть, что стойкость водоохлаждаемого свода составляет тысячи плавов, то стойкостью набивного слоя можно пренебречь.

Одновременно с работами, проводимыми на заводе «Сибэлектросталь», институт сотрудничал и с литейными цехами машиностроительных заводов. Водоохлаждаемые своды были внедрены в производство на ДСП-5 и ДСП-10 Электростальского завода тяжелого машиностроения, на ДСП-5 и ДСП-20 Рязанского завода кузнечно-прессового оборудования. Во всех случаях получали рост удельного расхода электроэнергии на 8–12 % в зависимости от режима эксплуатации печи. Как было указано выше, тепловые потери через единицу охлаждаемой поверхности практически одинаковы в любой печи. Следовательно, следует ожидать, что на печах большой вместимости, где отношение площади свода к часовой производитель-

ности существенно ниже, удельные тепловые потери будут ниже.

Поэтому следующим этапом работ было выбрано сотрудничество с Череповецким металлургическим комбинатом, где в ЭСПЦ эксплуатировались четыре ДСП-100. Совместно с ВНИИЭТО разработан проект плоского водоохлаждаемого свода. Изготовление металлоконструкций было организовано в котельно-монтажном цехе. Особую сложность вызвало изготовление сводового кольца из трубы 325×30 мм. Центральная часть свода выполнена в неохлаждаемом сводовом кольце из магнетитохромитовых огнеупоров (рис. 7). В декабре 1979 г. началась эксплуатация печи с этим сводом [7].

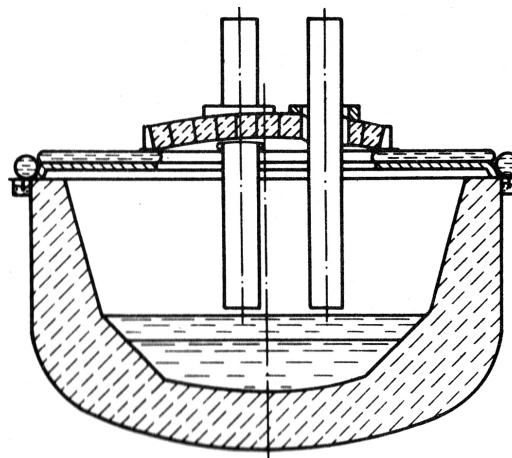


Рис. 7. Водоохлаждаемый свод ДСП-100 с центральной кирпичной частью

Положительные результаты эксплуатации ДСП-100 с водоохлаждаемым сводом конструкции МГВМИ послужили основанием для решения Минчермета о внедрении этих сводов на ДСП-100 Донецкого, Узбекского металлургических заводов и Орско-Халиловского, Новокузнецкого металлургических комбинатов. Металлоконструкции сводов для перечисленных предприятий по заказу Минчермета были выполнены Новосибирским предприятием «Сибэлектротерм» при авторском надзоре сотрудников института.

Сотрудники института принимали непосредственное участие в работах по внедрению в производство водоохлаждаемых сводов на перечисленных предприятиях.

С учетом накопленного опыта на ДСП-100 были начаты работы вместе с Волгоградским металлургическим заводом «Красный Октябрь». Был спроектирован, изготовлен и внедрен в производство водоохлаждаемый свод на ДСП-200. Диаметр свода – 10 м, масса металлоконструкций – 45 т. Кирпичный свод этой печи массой 120 т имел стойкость 60–70 плавов и набирался в течение 2–3 сут. Водоохлаждаемый свод находился в эксплуатации с 1987 г. до реконструкции цеха, когда ДСП-200

была заменена другим агрегатом. На этом же заводе водоохлаждаемый свод был установлен и на ДСП-25 в ЭСПЦ-4. В дальнейшем водоохлаждаемый свод был установлен и на ДСП-50 Запорожского завода «Днепрспецсталь».

Таким образом, водоохлаждаемый свод конструкции МГВМИ находится в эксплуатации на ДСП вместимостью от 1,5 до 200 т включительно. Эта конструкция защищена рядом авторских свидетельств и патентами США, Великобритании, ФРГ, Италии и Японии¹.

Использование водоохлаждаемых элементов кладки в ДСП стало обычным и повсеместным. Снятие ограничений по величине вводимой мощности привело к тому, что она достигает значений 1000 кВт·А/т и выше. Дополнительно вводится тепло с помощью газокислородных горелок.

В конструкциях МГВМИ в водяной полости размещены перегородки, образующие лабиринт для прохода воды к любой точке поверхности, как и в трубчатых конструкциях. Причем расход воды в конструкциях МГВМИ равен 2,5 т/ч на квадратный метр поверхности, а температура воды на выходе составляет 60–70 °С. На ДСП-10 завода «Сибэлектросталь» после проведения 6545 плавков произвели вскрытие водяной полости свода. Накипи на обогреваемой поверхности не обнаружено. Такие же результаты получены и при осмотре свода ДСП-100 завода «Северсталь», где уровень тепловых нагрузок на свод достигает значений 70–90 кВт/м².

Локальное (пузырьковое) кипение воды начинается при нагрузке 60 кВт/м², т. е. кипение воды происходит на обогреваемой поверхности свода и на ДСП-10 и на ДСП-100.

Отсутствие накипи объясняется тем фактом, что тепловые нагрузки на охлаждаемую поверхность в ДСП в течение плавки резко переменные. Коэффициент объемного расширения накипи близок к нулю и при изменениях тепловой нагрузки частицы накипи отрываются от поверхности и уносятся с потоком охлаждающей воды. Избежать выпадения солей жесткости из воды на охлаждаемую поверхность нельзя, но опасаться их отложения не следует.

Современный этап развития электросталеплавильного производства связан и с улучшением технологии плавки на «болоте», когда в печи после выпуска оставляют 10–15 % от массы стали и весь шлак за счет эркерного выпуска металла. При таком выпуске печь наклоняют лишь на 15°, что позволяет увеличить площадь водоохлаждаемых стеновых панелей. Теперь неохлаждаемыми участками остались подина, откосы, нижняя часть стен и центральная часть свода.

¹ На различных этапах в проведении работ принимали участие кандидаты технических наук: Г.М. Палий, Э.М. Григорьев, С.И. Герцык, В.В. Селеверстов, А.С. Морозов, А.И. Косырев; выпускники МГВМИ: А.В. Зубрев, М.В. Евдокимов, В.В. Королев, П.Н. Сидоров.

Дальнейшее совершенствование этой технологии заключалось в подаче в ванну порошка кокса. Углерод, вдвухаемый в расплав, окисляется частично закисью железа на границе раздела шлак – металл и частично напрямую кислородом.

Образующиеся пузырьки СО вспенивают шлак, который полностью экранирует дуги [8]. Однако в конце расплавления дуги открываются, интенсивно облучая нижнюю часть стеновых панелей, до момента образования пенного шлака. Этого оказывается достаточно для выхода воды через образовавшуюся трещину. Исследованием образца панели стен ДСП-150 ОАО «Северсталь» установлено, что наружная поверхность образца окислена. Слой оксидов неравномерен с многочисленными локальными участками с острыми углублениями. Поверхность металла разрыхлена на глубину 0,3–0,5 мм. Такое состояние свидетельствует о процессах газовой коррозии [9]. Острые углубления в зонах отслоившейся окалины могут служить микронадрезами и привести к зарождению трещин в условиях циклического нагрева и охлаждения [10]. Практика эксплуатации стеновых панелей на ДСП-150 подтверждает механизм разрушения. Теперь нижняя часть панелей выполняется из меди.

Для сокращения продолжительности плавления шихты применяют ввод дополнительной, так называемой альтернативной, энергии путем установки оконной и стеновых газокислородных горелок. При величине вводимой электрической мощности 500–600 кВт·А/т использование газокислородных горелок позволяло повысить производительность. Число стеновых горелок мощностью 3–3,5 МВт увеличивали до четырех–шести, что позволило сократить продолжительность плавления на ДСП-100 до 50–70 мин и снизить расход электроэнергии до 380–420 кВт·ч/т [8].

В течение 2004–2005 гг. введены в эксплуатацию ДСП вместимостью 175 и 320 т. Достигнуты показатели по производительности 230 и 320 т/ч при удельном расходе электроэнергии 290 и 359 кВт·ч/т [11].

В приведенных примерах используются альтернативные источники энергии; газ с кислородом и железо в качестве топлива. Поэтому угар металла в этих агрегатах достигает 10–15 %. Следует отметить, что с ростом вводимой электрической мощности эффективность использования газокислородных горелок снижается. В пределе ДСП будет работать как плавкий предохранитель: включено – расплавлено. Достижение максимума производительности не обязательно совпадает с максимумом эффективности. Условия теплообмена в системе «дуга – металл – шлак» резко отличны от тех, что были в ДСП до середины прошлого века [12].

Эти условия связаны и с соотношениями основных геометрических размеров ДСП. До настоящего времени отношение высоты стен от по-

рога до пяты свода к диаметру рабочего пространства (H/D) принимают равным 0,4, а отношение диаметра распада электродов к диаметру рабочего пространства $d/D = K$ равным 0,3. При таких соотношениях получали объем рабочего пространства, позволяющий вести плавку с одной подвалкой шихты, и размещение электродов для равномерного нагрева ванны. Проведение подвалки шихты производится при отвороте свода. При этом затрачивается время и часть тепла из открытой печи и от нижней поверхности отведенного свода. Для предотвращения указанных потерь была предложена новая конструкция печи с переменной степенью развития кладки [13]. Объем рабочего пространства печи увеличен за счет высоты стен и обеспечивает завалку всей массы шихты; по мере проплавления и оседания шихты свод опускается в рабочее пространство. Тем самым верхняя холодная часть кладки стен выводится из процессов теплообмена и не участвует в них на следующей плавке.

Указанные выше соотношения размеров ДСП справедливы и сейчас для печей литейных цехов машиностроительных заводов и цехов спецсталей.

Для большегрузных и сверхмощных печей, используемых для расплавления шихты с передачей полупродукта в установки по доводке металла, эти соотношения должны быть изменены.

Во-первых, дуга теперь практически в течение всей плавки экранирована от охлаждаемых стен сначала шихтой, а после расплавления – пенистым шлаком. Исключения только в момент зажигания дуги под сводом в начале плавки и в промежутки времени между полным расплавлением шихты и наведением пенистого шлака. По этой причине расход охлаждающей воды должен быть снижен до 2–3 т/м² поверхности.

Во-вторых, в этих печах параметр K составляет менее 0,2, что обеспечивает прорезание в шихте общего колодца, но при этом распределение источников нагрева по поверхности ванны после расплавления неравномерное, что ведет к повышению угара металла на площади ванны, ограниченной окружностью распада электродов.

Влияние параметра K на распределение тепловых нагрузок изучали на световой модели. Осо-

бый интерес представляет влияние положения электродов на теплоотдачу к ванне расплавленного металла. Значительный градиент температур по глубине ванны свидетельствует о том, что лимитирующим звеном процесса теплопередачи ко всей массе металла являются условия отвода тепла от поверхности внутрь ванны.

Поскольку передача тепла от поверхности ванны определяется теплопроводностью и конвекцией, то условием увеличения коэффициента теплоусвоения металла является равномерное распределение вводимой мощности по поверхности ванны в соответствии с одинаковыми условиями отвода тепла внутрь массы металла.

Это условие, однако, не может быть выполнено, так как мощность выделяется лишь в трех дугах. Но и в этом случае существует оптимальное расположение электродов, обеспечивающее равномерное распределение вводимой мощности по поверхности ванны. Сравнение положения линий уровня (произвольно очерченных вокруг осей электродов, но одинаковых по диаметру), представленных на рис. 8, свидетельствует о том, что более равномерным распределение подводимой мощности будет, очевидно, при $K = K_0$. Найдем значение K_0 , приняв следующие допущения: линии уровня каждого электрода имеют вид окружности; дуга горит строго по оси электрода (без учета эффекта «выдувания»); дуги равномощные.

Из рис. 8 ($K = K_0$) следует: $R = r_p + r$, где R – радиус плавильного пространства, r_p – радиус окружности распада электродов; r – радиус линии уровня, $r = 0,5a$ (a – сторона треугольника, вписанного в окружность распада электродов); $a = \sqrt{3} r_p$; $r = 0,5\sqrt{3} r_p$. Имея в виду, что $K = K_0 = r_p/R$, получим $K = 0,536$.

Итак, найдено значение $K = K_0$, при котором (при принятых допущениях) коэффициент теплоусвоения ванны имеет максимальное значение. При $K > K_0$ площадь, ограниченная линиями уровня, уменьшается (отсекается стенами печи); при $K < K_0$ эти площади накладываются, а суммарная площадь также уменьшается.

Поскольку дуга теперь экранирована от стен, появилась возможность увеличить высоту стен и

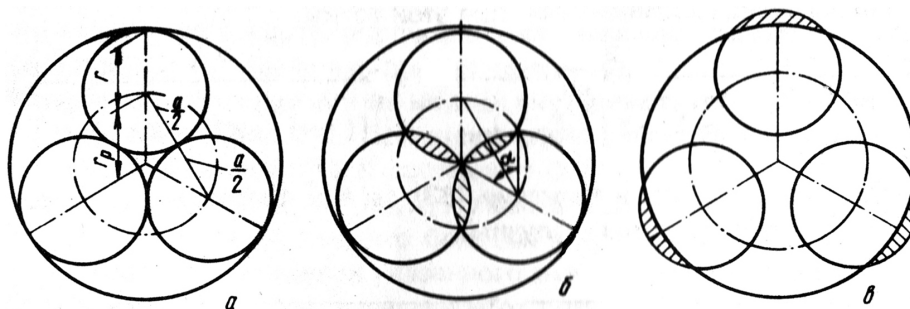


Рис. 8. Различные положения электродов относительно оси ванны:
а – $K = K_0$; б – $K < K_0$; в – $K > K_0$

обеспечить завалку всей массы шихты. Эта мера реализована [11]. Объем печи обеспечивает полную завалку шихты при ее плотности около 1 т/м^3 .

Параметр K необходимо увеличивать до значения, обеспечивающего проплавление общего колодца. При возрастающей вводимой мощности это, возможно, 0,25–0,30. Таким образом, современная ДСП используется как агрегат для расплавления шихты, использующий полную установленную мощность трансформатора. При этом эффективность использования альтернативных источников энергии снижается. Уменьшение удельных расходов газа, кислорода, части шихты, охлаждающей воды может обеспечить экономическую эффективность производства даже при некотором снижении производительности.

Например, в энергетическом балансе ДСП-160 с трансформатором 140 МВ·А (+ 10 %) литейно-прокатного комплекса ОАО «ОМК-Сталь» в г. Выкса доля тепла газокислородных горелок составляет 5–15 %.

Интенсивный отбор тепла из рабочего пространства, как было показано, мало сказывается на температуре поверхности раздела «шлак – металл», благодаря низкому коэффициенту теплопроводности пенного шлака и толщине слоя шлака около 500 мм. Использование тепла альтернативных источников энергии ведет к увеличению температуры отходящих газов и охлаждающей воды. Дальнейшие исследования энерготехнологических режимов эксплуатации ДСП с учетом изложенного являются необходимыми для обеспечения конечной цели – снижения затрат на производство.

Работы МГВМИ и заводов по переводу ДСП на использование водоохлаждаемых сводов конструкции МГВМИ регулярно экспонировались на ВДНХ СССР и специально отмечены постановлениями Главного Комитета ВДНХ СССР № 347–Н от 27.09.1973 г.; № 410–Н от 16.06.1977 г. и № 784–Н от 30.10.1981 г.

Литература

1. Кудрин, В.А. *Металлургия стали* / В.А. Кудрин, В.А. Шишимиров. – М.: МГВМИ, 2003. – 254 с.

2. Баринов, Н.А. *Новая конструкция свода для электродуговой печи* / Н.А. Баринов // *Литейное производство*. – 1961. – № 2. – С. 11–13.

3. *Эксплуатация дуговой электропечи с водоохлаждаемым сводом* / В.А. Кудрин, А.И. Смолин, О.М. Сосонкин, П.П. Блинов // *Металлург*. – 1969. – № 3. – С. 23–25.

4. Сосонкин, О.М. *Служба водоохлаждаемого свода на печи ДСВ-10А* / О.М. Сосонкин, А.И. Федченко, А.З. Шевцов // *Металлург*. – 1974. – № 3. – С. 23–24.

5. Сосонкин, О.М. *Водоохлаждаемый свод электродуговой печи* / О.М. Сосонкин, В.А. Кудрин. – М.: *Металлургия*, 1985. – 144 с.

6. *Повышение эффективности водоохлаждаемого свода электродуговой печи* / О.М. Сосонкин, Ф.Д. Румянцев, Г.М. Палий, С.В. Скрипченко // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 1975. – № 11. – С. 61–64.

7. Кудрин, В.А. *Особенности технологии электроплавки при работе печи с водоохлаждаемым сводом* / В.А. Кудрин, О.М. Сосонкин // *Сталь*. – 1983. – № 10. – С. 39–40.

8. Гудим, Ю.А. *Производство стали в дуговых печах* / Ю.А. Гудим, И.Ю. Зинуров, А.Д. Киселев. – Новосибирск: *Изд-во НГТУ*, 2010. – 542 с. – (*Современные электротехнологии*. Т. 9).

9. Щедров, К.П. *Жаростойкие материалы. Справочное пособие* / К.П. Щедров, Э.Л. Гакман. – М.; Л.: *Машиностроение*, 1965. – 167 с.

10. Веронский, А. *Термическая усталость металлов. Пер. с пол.* / А. Веронский. – М.: *Металлургия*, 1986. – 129 с.

11. Еланский, Д.Г. *Электрометаллургия стали – инновации в технологии и оборудовании* / Д.Г. Еланский, Г.Н. Еланский, А.Я. Стомахин // *Сталь*. – 2009. – № 8. – С. 35–40.

12. Сосонкин, О.М. *Особенности теплообмена в дуговой сталеплавильной печи* / О.М. Сосонкин, М.В. Шишимиров // *Сталь*. – 2004. – № 8. – С. 34–36.

13. А.с. № 287238 СССР *Электродуговая сталеплавильная печь*. / А.И. Ващенко, В.А. Кудрин, М.Ф. Сидоренко, О.М. Сосонкин // *Б.И.* – 1970. – № 35.

Сосонкин Олег Михайлович, д-р техн. наук, профессор, Московский государственный вечерний металлургический институт, г. Москва; oleg.m.sosonkin@gmail.com.

Шишимиров Матвей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, начальник отдела обеспечения работы научно-технического совета и учёного совета, Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, г. Москва; smatvej@yandex.ru.

Поступила в редакцию 23 апреля 2015 г.

POWER AND TECHNOLOGICAL FEATURES OF STEEL MELTING IN ELECTRIC ARC FURNACE AND TRANSFERRING EAF TO OPERATION WITH WATER-COOLED ROOF DESIGNED IN MOSCOW STATE EVENING METALLURGICAL INSTITUTE

O.M. Sosonkin, Moscow State Evening Metallurgical Institute, Moscow, Russian Federation, oleg.m.sosonkin@gmail.com,

M.V. Shishimirov, All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, Moscow, Russian Federation, smatvej@yandex.ru

The work shows the necessity and possibility of replacement of brickwork in steelmaking electric arc furnace roof with water-cooled elements as the power introduced to the furnace increases. Such replacement results in some increase of specific energy consumption, mainly due to increase of losses during the oxidation and reduction periods of the melt, which is offset with reducing the furnace downtime for replacement of brickwork roof. Specific energy consumption decreases with increasing furnace productivity. Heat losses can also be reduced by screening the roof by injection of carbon-bearing gases to the furnace. The ways to achieve the maximum effectiveness of furnaces with water-cooled roofs by increasing productivity and changing the geometrical parameters of the furnace are also considered. The water-cooled roof designed in the Moscow State Evening Metallurgical Institute was operated at EAFs with capacities ranging from 1.5 to 200 t, and new EAFs of 175 and 320 t were put into operation in 2004–2005. Productivity indices of 230 and 320 t/hour were achieved, with specific electric energy consumption of 290 and 359 kWh/t.

Keywords: furnace; roof; arc; productivity; losses; gas; oxygen.

References

1. Kudrin V.A., Shishimirov V.A. *Metallurgiya stali* [Steel Metallurgy]. Moscow, MGVM I Publ., 2003. 254 p.
2. Barinov N.A. [New Design of Roof for Electric Arc Furnace]. *Litoye proizvodstvo*, 1961, no. 2, pp. 11–13. (in Russ.)
3. Kudrin V.A., Smolin A.I., Sosonkin O.M., Blinov P.P. [Operation of an Electric-Arc Furnace with Water-Cooled Roof]. *Metallurgist*, 1969, vol. 13, no. 3, pp. 173–175. doi: 10.1007/BF00733910.
4. Sosonkin O.M., Fedchenko A.I., Shevtsov A.Z. Life of the DSV-10A Furnace Water-Cooled Roof. *Metallurgist*, 1974, vol. 18, no. 3, pp. 198–200. doi: 10.1007/BF00764783.
5. Sosonkin O.M., Kudrin V.A. *Vodookhlazhdaemyy svod elektrodugovoy pechi* [Water-Cooled Roof of Electric Arc Furnace]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 144 p.
6. Sosonkin O.M., Rumyantsev F.D., Pali G.M., Seleverstov V.V., Skripchenko S.V. Improving the Efficiency of a Water-Cooled Arc Furnace Roof. *Steel USSR*, 1975, vol. 5, no. 11, pp. 610–611.
7. Kudrin V.A., Sosonkin O.M. [Features of Melting Technology in Operation of Electric Arc Furnace with Water-Cooled Roof]. *Stal'*, 1983, no. 10, pp. 39–40. (in Russ.)
8. Gudim Yu.A., Zinurov I.Yu., Kiselev A.D. *Proizvodstvo stali v dugovykh pechakh* [Electric Arc Furnace Steelmaking]. *Sovremennye elektrotehnologii. Tom 9* [Modern Electric Technologies. Vol. 9]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2010. 542 p.
9. Shchedrov K.P., Gakman E.L. *Zharostoykie materialy* [Refractory Materials]. Moscow, Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1965. 167 p.
10. Weroński A. *Zmęczenie cieplne metali*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1983. 243 p.
11. Elanskii D.G., Elanskii G.N., Stomakhin A.Ya. Innovations in the Electrometallurgy of Steel. *Steel in Translation*, 2009, vol. 39, no. 8, pp. 684–689. doi: 10.3103/S0967091209080154.
12. Sosonkin O.M., Shishimirov M.V. Heat Transfer in Steel-Smelting Arc Furnaces. *Steel in Translation*, 2004, vol. 34, no. 8, pp. 17–20.
13. Vashchenko A.I., Kudrin V.A., Sidorenko M.F., Sosonkin O.M. *Elektrodugovaya staleplavil'naya pech'* [Steelmaking Electric Arc Furnace]. Patent USSR, no. 287238, 1970.

Received 23 April 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Сосонкин, О.М. Энерготехнологические особенности плавки стали в дуговой сталеплавильной печи и перевод ДСП на работу с водоохлаждаемым сводом конструкции МГВМИ / О.М.Сосонкин, М.В. Шишимиров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 62–69.

FOR CITATION

Sosonkin O.M., Shishimirov M.V. Power and Technological Features of Steel Melting in Electric Arc Furnace and Transferring EAF to Operation with Water-Cooled Roof Designed in Moscow State Evening Metallurgical Institute. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 62–69. (in Russ.)