УДК 669.536

Л.М.ШАЛЫГИН, Г.В.КОНОВАЛОВ, Т.Р.КОСОВЦЕВА
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*)

УСЛОВИЯ ПОДАЧИ ДУТЬЯ В РАСПЛАВЫ И РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДУТЬЕВОГО РЕЖИМА

Рассмотрены существующие способы подачи дутья в расплав. Показана возможность увеличения удельной производительности автогенной печи, снижение брызгоуноса и потерь тепла во внешнюю среду с помощью пространственно ориентированной подачи дутья, которая придает расплаву регулируемое вращательное движение. Описан принципиально новый класс радиально осевых фурм, обеспечивающих пространственно ориентированную подачу дутья.

In this paper the existing methods of an air-blast supply in a melt are considered. The capability of increase of a specific duty of an autogenous furnace, lowering of metal splashings and heat wastes with the help of a spatially oriented air-blast supply is exhibited, which one attaches a melt regulated rotary movement. The essentially new class radially of axial blowing tuyeres ensuring a spatially oriented air-blast supply is described.

В любом варианте расплавленная среда при подаче газа испытывает действие трех сил: динамического напора струй, резкого термического расширения и архимедову силу всплытия газового объема из толщи расплава. Совокупное воздействие этих сил и определяет динамику расплавленной ванны и формирует кинетические условия протекающих в конвертере физико-химических процессов.

Опытами на физических моделях, работающих при различных вариантах подачи дутья, сопоставленными с наблюдениями на действующих промышленных образцах, установлены три важных в практическом отношении факта [4, 5]:

1. При различных вариантах подачи дутья наблюдается различная величина предельной дутьевой нагрузки, т.е. количества дутья, приходящегося на единицу рабочего объема аппарата, превышение которого приводит к возникновению массированных выбросов расплава из аппарата, что определяет и возможную производительность аппарата $\upsilon_{пред}$. Так, для бессемеровского конвертера с донными фурмами предельная производительность 4-5 $м^3/(м^2 \cdot мин)$, для горизонтального и вертикального с верхней кислородной фурмой конвертеров соответственно 10-13 и 6-8 $м^3/(м^2 \cdot мин)$, для печи Ванюкова с боковой двухсторонней погруженной подачей дутья 8-10 $м^3/(м^2 \cdot мин)$.

2. Во всех вариантах подачи дутья наблюдается зональный характер процесса тепловыделения, обусловленный экзотермическими процессами. Очаг наиболее высоких температур возникает в зоне непосредственного контакта дутьевой струи с расплавом. В соответствии с этой особенностью на практике исключается возможность применения кислорода для донной (в бессемеровском конвертере) или боковой (в горизонтальном конвертере) подаче дутья или требуется особо интенсивный режим охлаждения фурменных стенок (печь Ванюкова). Таким образом, использование кислорода в конвертерном процессе вынудило ограничиться вариантом верхней непогруженной струи.

3. Формирование процессов массотеплопереноса в объеме расплавленной ванны и условий протекания физико-химических

возможностей также определяется способом подачи дутья. Наибольшей завершенностью массотеплопереноса отличается вариант донного дутья, в котором силы динамического напора, силы Архимеда и силы термического расширения по направлению совпадают между собой и производят энергичное перемешивание всего объема ванны, обеспечивая его химическую и термическую однородность. Однако это векторное совпадение сил ограничивает подачу дутья. Термическая нестойкость днища не позволяет использовать кислород, поэтому такой тип конвертерного аппарата, по нашему мнению, не имеет перспективы, несмотря на попытки создать донно-дутьевой узел с подачей кислорода совместно с периферийной газовой защитой.

Для самого распространенного в металлургии меди и никеля горизонтального конвертера характерна отчетливо выраженная неоднородность химического и теплового полей. Это объясняется тем, что в условиях ограниченной предельной дутьевой нагрузки, до 10-13 $м^3/(м^2 \cdot мин)$, близкая к горизонтальному направлению сила динамического напора дутьевых струй оказывается слабее архимедовых сил всплытия газового объема, направленных вертикально вверх. Алгебраическое суммирование сил совместно с термическим расширением газа обеспечивает такой запас количества движения, который создает в прифурменной зоне интенсивный, бурно протекающий циркуляционный процесс, захватывающий примерно 1/6 объема расплава. Энергия прифурменной зоны лишь в ограниченной степени передается остальному объему расплава.

Слабое развитие массотеплообмена в этой части ванны определяет и недостаточную полноту реакций обменного взаимодействия и шлакообразования, протекающих в гетерогенной системе с участием кремнезема по схеме:

$$2MeO + 2FeS + SiO_2 = 2MeS + 2FeO \cdot SiO_2;$$

$$3Fe_3O_4 + FeS + 5SiO_2 = 5(2FeO \cdot SiO_2) + SO_2.$$

Несомненно, что высокое содержание магнетита в конвертерных шлаках и отвечающее ему присутствие в них цветных металлов является следствием слабого развития указанных реакций.

При верхней непогруженной подаче дутья сила динамического напора струи направлена навстречу архимедовым силам всплытия. Характерной особенностью дутьевого кратера при вертикальном расположении фурм является значительный вынос (в основном с его периферии) брызг расплава, которые попадают и на корпус фурмы, создавая тяжелые условия ее эксплуатации, а при превышении предела вылетают за пределы рабочего объема.

Тепловыделение происходит за счет экзотермических реакций, сосредоточенных в пределах кратера, который представляет собой локальный очаг бурно протекающего механического процесса и весьма высоких температур, которые по измерениям на кислородном медеплавильном конвертере достигают до 2500-2800 °С. В периферийных участках ванны процессы тепломассопереноса не получают достаточного развития, т.е. наблюдается такой же зональный характер тепловых, массообменных и энергетических процессов, который отмечался и в горизонтальном конвертере.

Эффект использования пространственно-ориентированных струй и принцип работы аппарата струйного вращения (АСВ). Характер взаимодействия непогруженной струи с расплавом резко изменяется при отклонении ее от вертикального положения. В этом случае при ударе струи о поверхность расплава возникает горизонтальная составляющая силы динамического напора, пропорциональная синусу угла наклона струи. Это составляющая создает на поверхности жидкой среды отгонную волну, распространяющуюся со скоростью, отвечающую динамическим характеристикам струи и углу ее наклона. При этом глубина кратера уменьшается соответственно уменьшению вертикальной составляющей динамической силы. Брызгоунос уменьшается, траектория выноса брызг направлена в сторону от фурмы, за счет чего следует ожидать и снижения разрушительного воздействия на фурму.

Наиболее упорядоченной и управляемой формой массопереноса в объеме жидкости следует считать круговое движение жидкости в сосуде цилиндрической формы. Такое вращение возможно создать за счет действия наклонных непогруженных струй. Поступательное движение волны, создаваемой наклонной струей при векторе, направленном по касательной к цилиндрической стенке, превращается во вращательное движение жидкости. Подачей нескольких пространственно ориентированных струй, работающих по периферии цилиндрического сосуда, можно добиться желаемой интенсивности кругового массообмена по всему объему жидкости.

На этом принципе создана физическая модель аппарата новой конструкции (рис.1), названного АСВ. Исследованиями на модели, выполненными на холодных жидкостях различной плотности (от 1 до 4 г/см^3), установлено, что максимальная скорость вращения жидкости достигается при угле наклона струй 20-25° к вертикали при отношении радиуса приложения напора струй к радиусу цилиндра $R_0/R \approx 0{,}7$ [2, 5]. При такой пространственной ориентации дутьевых струй установлено на реальных расплавах практически полное усвоение кислорода дутья [1].

Для осуществления принципа АСВ применительно к реальным пирометаллургическим процессам (конвертирование штейнов или чугуна, автогенная плавка сульфидного сырья) потребовалась разработка дутьевых устройств особой конструкции, которые получили название радиально-осевых фурм.

Конструкция фурм для продувки расплавов. Начиная с 1880-х гг. в металлургию меди, а позже и никеля внедряются конвертеры с боковым расположением фурм. Первоначально это были вертикальные конвертеры типа реторты Ауэрбаха или селектора Поля Давида, а с 30-40-х гг. XX в. повсеместно распространяется горизонтальные конвертеры Пирса и Смита. Общей конструктивной деталью фурменных устройств конвертеров является особый шаровой клапан, которым оборудуется корпус фурмы, клапан Дибли, сохранившийся до настоящего времени. За почти столетнюю историю существования горизонтального конвертера выполнено множество исследований, направленных на совершенствование фурменной системы конвертеров [3]. Общей задачей этих исследований было, во-первых, нахождение системы с наименьшим гидравлическим сопротивлением с тем, чтобы обеспечить наиболее полный переход статического напора (давления) дутья, создаваемого воздуходувными машинами, в динамический напор дутьевой струи, посту-

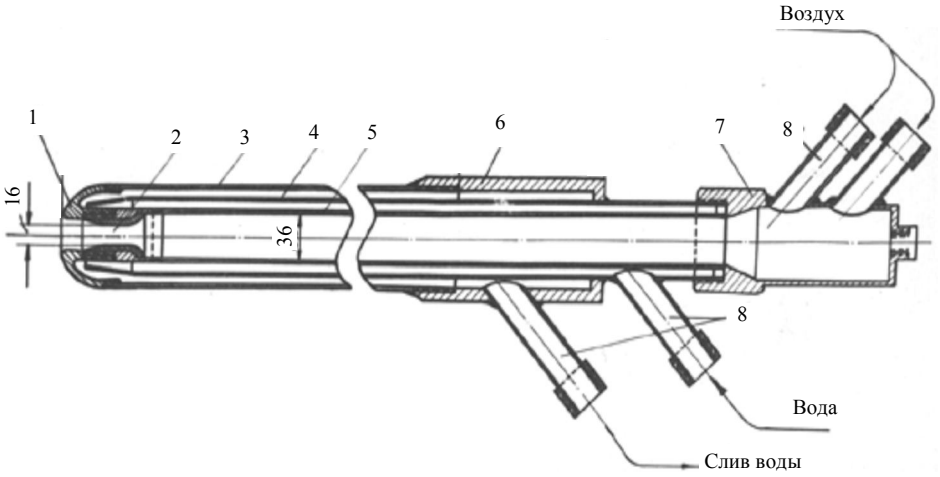


Рис.1. Конструкция кислородной фурмы

1 – головка фурмы; 2 – калибр; 3 – кожух сопла; 4 –средняя труба; 5 – дутьевой канал; 6 – соединительный стакан; 7 – штуцерная коробка; 8 – штуцеры

пающей в расплав, а во-вторых, обеспечение равномерного распределения дутья по всей длине фурменного пояса, насчитывающего в современных конвертерах до 60-80 фурм диаметром 35-50 мм. Исследования по разработке оптимальных конструкций фурм горизонтальных конвертеров были начаты в 60-х гг. прошлого века в Ленинградском горном институте. Эти работы получили продолжение, в результате чего в мировой практике и в России появилось несколько конструкций воздухораспределительной системы конвертеров, каждая из которых в наибольшей степени отвечает конкретным условиям того или иного конвертерного предприятия.

Для расчета удельного количества дутья, подаваемого на 1 см^2 сечения фурменной трубки, предложена формула

$$\vartheta_{уд} = 63{,}6mP_1\varphi\sqrt{\frac{1}{T\rho_0}\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1{,}429} - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1{,}714}\right]},$$

где ρ_0 – плотность газа, кг/м^3; P_1 – абсолютное давление перед насадкой, ата; P_2 – абсолютное давление в среде, куда происходит истечение, ата; m – степень чистоты фурмы, при непогруженной подаче дутья $m \approx 1$; φ – коэффициент аэродинамики фурменной системы; T – температура струи, К.

Фурменное устройство, предназначенное для непогруженной подачи дутья, работает на ином по сравнению с погруженными фурмами принципе. Вертикальный кислородный конвертер оборудуется одной фурмой, которая вводится в рабочее пространство конвертера по его вертикальной оси. Большая часть корпуса такой фурмы находится в напряженных температурных условиях, а нижний ее конец (рабочая головка) подвергается непосредственному воздействию вертикальных всплесков расплавленного металла. Для таких условий необходимо интенсивное принудительное охлаждение фурмы, которое в настоящее время повсеместно осуществляется водой. По данным практики, расход воды на фурму 30-тонного конвертера составляет в среднем 70 м^3/ч (данные комбината «Североникель»), для 300-тонного – 350 м^3/ч (данные комбината «Северсталь»). Дутьевая струя должна пробить поверхность расплава, внедриться на возможно большую глубину и тем создать активный массотеплообмен в объеме расплава. Практикой установлено, что диаметр дутьевой воронки для создания энергичного массообмена должен быть не менее 300-400 мм. Установлено также, что приближение рабочей головки фурмы к поверхности расплава, допустимое по условиям ее стойкости, должно составлять не менее 20-30 калибров (диаметров рабочей насадки).

В обычной конструкции кислородной фурмы с одной насадкой дутьевой канал таких фурм выполняется по центральной оси фурмы (рис.1). Сечение центрального канала рассчитывается на скорость потока не более 20-25 м/с (в рабочих условиях) во избежание чрезмерных потерь на трение.

Вода для охлаждения кислородных фурм подается в промежуточную трубу, концентрически охватывающую дутьевой канал и доставляющую воду вниз к дутьевой головке. Из дутьевой головки вода возвращается по кольцевому каналу, образованному промежуточной трубой и наружным кожухом. Режим охлаждения нескольких образцов кислородных фурм по практическим данным следующий:

Место установки конвертера	«Североникель»		«Северсталь»
Емкость конвертера, т	30	0,15	350
Замеренный или расчетный расход воды, м^3/ч	70	0,22	350
Размеры активного участка:			
длина, м	5	0,1	14
диаметр, м	0,25	0,038	0,426
площадь, м^2	3,92	0,012	18,67
Удельный расход, м^3/(ч·м^2)	17,9	18,3	18,75

Таким образом, удельный расход воды на 1 м^2 рабочей (т.е. находящейся в зоне высоких температур) поверхности может приниматься в пределах 17-20 м^3/ч. Весьма большой размер рабочей поверхности единичной кислородной фурмы, требующий огромного расхода воды, обусловлен самим принципом работы кислородного вертикального конвертера. Фурма вводится через горловину конвертера, рабочая головка устанавливается на расстоянии 30-40 калибров (диаметров насадки). Корпус фурмы почти на всей длине оказывается в зоне интенсивного теплового воздействия потоков раскаленных газов и всплесков расплава, вырывающегося из дутьевого кратера. Большая длина кислородной фурмы, кроме того, требует значительного увеличения высоты цеха, поскольку при всех поворотах конвертера фурма должна выводиться из рабочей полости на всю ее длину, что может быть обеспечено соответствующим пространством над конвертером.

При центральной подаче дутья единичной фурмой процессы, происходящие в дутьевом кратере, отличаются чрезмерной интенсивностью. Налицо очевидная динамическая, химическая и термическая перегрузка. В то же время в периферийных участках расплава процессы не только развиваются в замедленном темпе, но и носят неуправляемый характер, обусловленный динамически неустойчивым, случайным характером динамики дутьевого кратера.

Применительно к вертикальным фурмам предпринимались неоднократные попытки создать такую конструкцию дутьевой головки, которая сформировала бы вращающую струю, способную привести во вращение дутьевой кратер и придать определенную направленность массообменному процессу в объеме расплава. Поэтому при разработке новой конструкции фурмы, а на базе ее и новой конструкции пирометаллургического аппарата авторы ставили перед собой следующие задачи:

- заменить направленное по центру ванны дутье единичной фурмой дутьевыми струями, рассредоточенными по нескольким точкам, расположенным по периферии цилиндрического аппарата;
- придать периферийным струям такую пространственную ориентацию, чтобы за счет их суммарного динамического воздействия привести расплавленную массу во вращательное движение, способное создать управляемый регулярный массо- и теплоперенос, в наибольшей степени отвечающий требованиям кинетики, соответствующих физико-химических превращений;
- отказаться от увеличения высоты цеха;
- многократно сократить размер огневой (рабочей) зоны фурмы и тем радикально уменьшить расход воды на ее охлаждение.

Указанным принципам отвечает разработанная нами конструкция радиально-осевой фурмы.

Магистральная часть фурмы новой конструкции (рис.2), как и обычной фурмы, набирается из комплекта трех стандартных стальных труб, концентрически входящих одна в другую. Однако, назначение каналов, образуемых этими трубами, иное. По центральной трубе подается вода, дутье подается в кольцевой канал, образованной центральной и промежуточной трубами и заканчивающийся дутьевой камерой, выполненной в точеной медной головке. В теле этой головки высверливается дутьевая насадка, ось которой направлена под углом 120° к продольной оси корпуса фурмы. Дутьевая насадка подвергается необходимой внутренней обработке.

Система охлаждения РОФ также отличается от обычных фурм. Поскольку вокруг водоподводящей трубы существует кольцевой канал, заполненный газовым потоком, вода в ней сохраняет первичную минимальную температуру и при такой температуре с максимальной скоростью ударяет в днище дутьевой головки, выполненное в форме колпака и сочлененное с головкой резьбовым соединением, чем достигается максимальная интенсивность охлаждения этой наиболее теплонапряженной детали. Из полости колпака вода устремляется по продольным сверлениям в кольцевой канал отвода воды. Вся сборка

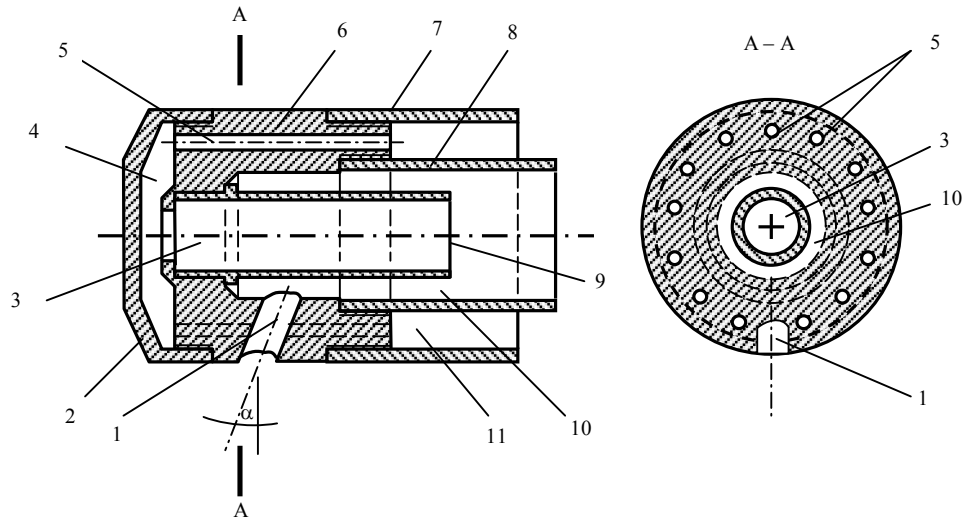


Рис.2. Радиально-осевая фурма

1 – дутьевая насадка; 2 – глухой колпак; 3 – тракт для подвода охлаждающей воды; 4 – циркуляционная камера; 5 – сквозные продольные сверления; 6 – наконечник; 7, 8 и 9 – соответственно внешняя, промежуточная и внутренняя трубы; 10 – тракт для подачи продувочного агента; 11 – тракт для отвода охлаждающей воды

дутьевой головки выполняется на резьбовых соединениях и в отличие от существующих кислородных фурм не имеет на рабочем конце сварных швов, что существенно повышает ее эксплутационную надежность.

Конструкция фурмы обеспечивает и ее взрывобезопасность, поскольку в случае прогара днища фурмы и прорыва воды струи воды и дутья оказываются пространственно разобщенными. Вода не попадает в дутьевой кратер, и неизбежный в случае попадания воды взрыв при новой конструкции фурмы исключается. Это подтверждено испытаниями на укрупненной огневой установке комбината «Североникель».

Гидродинамические характеристики усложненных по сравнению с обычными фурмами конфигураций дутьевого и водяного каналов РОФ не поддаются расчету и были определенны экспериментально. Для фурм серии РОФ в среднем $\varphi = 0{,}83 \div 0{,}84$. Следует иметь в виду, что эта величина не учитывает сопротивления подводящих шлангов.

Водяная система охлаждения фурмы РОФ моделировалась методом продувки ее воздухом. Результаты испытаний показывают, что сопротивление системы охлаждения фурм РОФ меньше 1 атм, что обеспечивает возможность применения к фурмам РОФ взрывобезопасного метода охлаждения под разрежением.

Таким образом, устройство радиально осевых фурм позволяет создать пирометаллургический аппарат новой конструкции. Аппарат струйного вращения представляет собою вертикальный цилиндр ограниченной высоты, перекрытый сверху сводом, снабженный примыкающим к верхней части газоходом.

Радиально-осевые фурмы в количестве, отвечающем заданной производительности, давлению дутья и принятым размерам дутьевых насадок устанавливаются в стенке цилиндра. Проходя через кожух и огнеупорную кладку, фурмы выполняют одновременно роль холодильников, улучшающих службу огнеупоров. Рабочая зона фурмы, находящаяся в огневом пространстве, по длине не превышает 1-1,5 диаметров рабочей головки.

Итак, пространственно ориентированная подача дутья, создаваемая за счет предложенного дутьевого узла, позволит интенсифицировать тепломассообменные процессы, форсировать процесс плавки и обеспечить условия безопасной непрерывной работы аппарата струйного вращения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гальнбек А.А.* Непрерывное конвертирование штейнов. М.: Металлургия, 1993. 86 с.

2. *Коновалов Г.В.* Особенность массообмена под действием радиально-осевых дутьевых струй // Записки Горного института. СПб, 2002. Т.150 (II). С.120-122.

3. *Шалыгин Л.М.* Конвертерный передел в цветной металлургии. М.: Металлургия, 1965. 160 с.

4. *Шалыгин Л.М.* Воздействие условий подачи дутья на характер тепломассообмена в конвертерной ванне // Цветные металлы. 1998. № 4. С.27-30.

5. *Шалыгин Л.М.* Структура теплового баланса, теплогенерация и теплоперенос в автогенных металлургических аппаратах разного типа / Л.М.Шалыгин, Г.В.Коновалов // Цветные металлы. 2003. № 10. С.17-25.