

Н.М.Можаренко, А.А.Параносенков, Н.М.Загоровская

ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА НА ВТОРИЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ УСЛОВИЯ ЗОНЫ ГОРЕНИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Исследовано влияние распределения газового потока по окружности печи на вторичные процессы зоны горения в доменной печи. Изучена взаимосвязь температурных условий фурменной зоны и горения кокса в доменной печи.

В предыдущих расчетах [1,2] не учитывались вторичные процессы в газовой фазе: сгорание монооксида углерода и водорода, реакции разложения углекислоты и водяного пара. Горение монооксида углерода и водорода является гомогенными цепными реакциями. Данные цепные газовые реакции напрямую зависят от содержания в газовой фазе радикалов Н и ОН, необходимых для зарождения цепных реакций с разветвленными цепями. Следовательно, с увеличением относительного количества природного газа на фурме (по отношению к расходу дутья) скорость горения монооксида углерода и водорода должна увеличиваться, что способствует ускорению горения кокса в доменной печи, так как догорание первичной СО тормозит непосредственное взаимодействие кислорода с твердым углеродом [3].

По зависимости скорости взаимодействия работы [4] были проведены расчеты для определения области реагирования реакции газификации углерода кокса диоксидом углерода при следующих условиях: энергия активации 167,6 кДж/моль, $k_0=30\ 000$ м/с, $Re=17\ 112$, $v=46$ м/с, $c_0=0,42$ кг/м³.

Были получены следующие температуры: 1441⁰С – температура равенства скоростей химической реакции горения и переноса окислителя к поверхности взаимодействия; 2509⁰С – температура превышения скорости химической реакции горения над скоростью переноса окислителя к поверхности взаимодействия в 100 раз. Следовательно, реакция газификации углерода диоксидом углерода (и схожего процесса – газификации водяным паром) для наших условий протекает в кинетической и переходной областях реагирования. При этом на скорость взаимодействия можно влиять с помощью изменения температуры.

Следствием газификации кокса является его чрезмерное измельчение, что ухудшает проницаемость расплавов через коксовую насадку, а при одностороннем развитии реакции нарушает ровность работы печи по окружности. К тому же, при более высоких температурах, когда развиваются реакции газификации кокса, быстрее снижается механическая прочность топлива [5]. Поэтому для ровности схода материалов по окружности доменной печи необходима равномерность температурного уровня фурменных очагов. В общем случае развитие газификации кокса будет

способствовать замедлению движения шихтовых материалов за счет снижения газопроницаемости и фильтрационной способности слоя кокса.

Как показали расчеты, среднеквадратичное отклонение скорости газификации кокса диоксидом углерода по воздушным фурмам доменной печи №9 ОАО «Криворожсталь» (ныне – ОАО «Миттал Стил Кривой Рог») 31.08.2005 составляло 9% от среднего значения, а разность наибольшего и наименьших значений скорости равнялась 50% от среднего. Относительные скорости реакции по прилеточным частям фурменной зоны были распределены следующим образом: 1 летка – 101% от среднего, 2 летка – 105%, 3 летка – 97% и 4 летка – 97%.

В то же время на доменной печи при выпуске чугуна и шлака в смене через 2 и 4 летку, наблюдавшаяся склонность к большему перекосу уровня засыпи над 3 и 4 леткой (по результатам измерения механического уровнемера и радиолокационных измерителей) согласуется с нашими выводами.

Увеличение температуры вызывает ускорение химических реакций по экспоненциальной зависимости уравнения Аррениуса. Однако при горении кокса в доменной печи в кинетической области реагирования протекает газификация кокса диоксидом углерода и парами воды, ускорение которой, как было рассмотрено выше, нежелательно. В диффузионной и внешнедиффузионных областях взаимодействия, где протекает горение твердого топлива, первостепенное значение принадлежит газодинамическим условиям фурменной зоны.

К тому же, как показано в работе [3], с увеличением температуры отношение скорости горения углерода кокса к скорости его газификации уменьшается, рис.1. Следовательно, при низких температурах преимущество в процессе окисления твердого топлива принадлежит процессу горения кокса, при высоких – его газификации. При описании закономерности на рис.1 степенной зависимостью определено, что равенство скоростей горения к газификации углерода топлива достигается при температуре 1616⁰С. При более высоких температурах скорость взаимодействия диоксида углерода и кокса выше скорости горения топлива.

Поэтому для повышения газопроницаемости слоя кокса следует стремиться к установлению постоянства температурных условий фурменной зоны и наименьшего значения теоретической температуры горения газов в печи.

Следует учитывать влияние температуры на взаимодействие других газовых составляющих дутья. При высоких температурах в результате диссоциации и высокой активности атомов и радикалов начинают с заметными скоростями протекать новые реакции. Некоторые из них являются источниками вредных веществ. Так, при высоких температурах в фурменной зоне образуются оксиды азота с затратой теплоты и расходом кислорода (оксид азота образуется при температурах 1800–2000⁰С,

атомарный азот – выше 2000°C), а также цианиды, при температурах выше 2000°C [6].

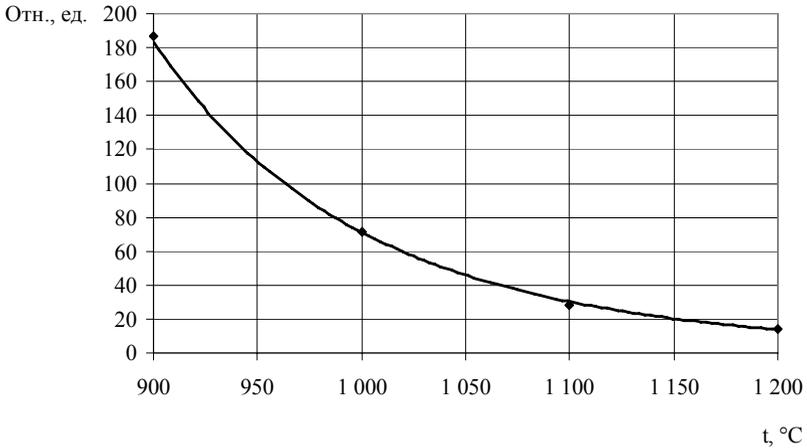


Рис.1. Влияние температуры (t , $^{\circ}\text{C}$) на отношение скоростей горения к газификации углерода (Отн.)

Поэтому при стремлении торможения этих нежелательных реакций путем установления постоянства температурных условий фурменной зоны и наименьшего значения теоретической температуры горения газов в печи дополнительно решается важная экологическая задача снижения вредных выбросов на производстве.

От температуры фурменной зоны зависит скорость окисления чугуна и возгонка оксидов шлака. При расчете доли кислорода дутья, израсходованного на окисление чугуна при его попадании в фурменные очаг, проведенном на примере железа, среднее значение доли кислорода составляло 22,4% при среднеквадратичном отклонении равном 16% и разности наибольшего и наименьшего значений равной 62%. Учитывая окисление других составляющих чугуна, рассчитанная доля кислорода, окисляющего чугун в фурменном очаге, составляет 25%. Данный расчет основан на том, что через фурменные очаги различного объема проходит и, соответственно, окисляется различное количество чугуна. Однако больший объем фурменных очагов обусловлен в основном большим расходом дутья, вызывающим также увеличение кинетической энергии потока газов и теоретической температуры горения, которые ускоряют скорость окисления чугуна за счет распыления и ускорения взаимодействия с кислородом расплавов.

Кроме того, все три причины, вызывающие увеличение количества окисляющегося чугуна в фурменных очагах, приводят также к ускорению в них возгонки оксидов, которая требует значительного количества теплоты зоны горения.

Влияние температурных условий фурменной зоны оказывают влияние на физическое состояние кокса, которое заключается в графитизации кокса в доменной печи и скорости плавления золы топлива.

Плавление золы топлива затрудняет взаимодействие окислителя с углеродом кокса за счет покрытия углеродистой поверхности расплавом, заполнения пористого строения куска и ошлакования золы кокса. Зола кокса криворожского коксохимического завода по данным работы [5] при расчете на три составляющих на трехкомпонентной шлаковой диаграмме находится в области муллита с температурой плавления 1600°C (рис.2). Поэтому при увеличении температуры фурменного очага должно происходить снижение скорости горения кокса за счет плавления золы кокса.

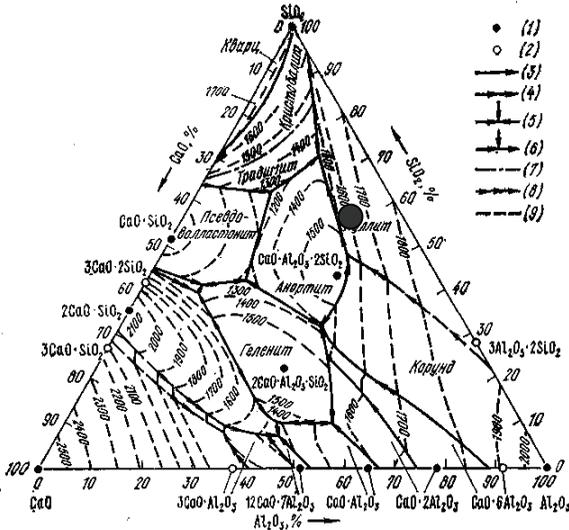


Рис.2. Диаграмма состояния системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, точкой обозначено место на диаграмме химического состава золы кокса

Графитизация кокса обычно после коксования составляет 15–20% при наибольших температурах коксования $900\text{--}1100^{\circ}\text{C}$. В доменной печи происходит дальнейшая графитизация вещества кокса за счет превышения рабочими температурами доменной печи наибольших температур коксования, при чем с увеличением температуры повышается степень графитизации кокса.

При замедлении движения шихты в какой-либо части печи по окружающей увеличивается степень графитизации кокса за счет увеличения времени выдержки в области высоких температур. В свою очередь это приводит к снижению скорости горения кокса у фурм, что еще более задерживает сход материалов. Снижение рудной нагрузки в данной части окружающей колосника приводит к увеличению в ней газопроницаемости и расхода дутья на соответствующих фурмах, что приводит к увеличению

температуры фурменных очагов с приведенными выше недостатками его влияния на горение кокса.

Учитывая это, одновременно или согласованно с внесением окружной неравномерности распределения рудных нагрузок по окружности колошника доменной печи необходимо соответственное управление распределением газового потока по фурмам. Единственным способом, позволяющим достаточно гибко воздействовать на газодинамические и температурные условия газового потока в фурменном очаге, является изменение отношения расхода природного газа к расходу дутья по фурмам или доли природного газа по отношению к дутью. Теснота линейной взаимосвязи расходов дутья и природного газа с показателями работы фурменных очагов приведена в таблице, из которой следует, что обобщающий показатель расходов дутья и природного газа по фурмам – отношение расхода природного газа к дутью по фурмам – достаточно надежно позволяет осуществлять управление газодинамическими и тепловыми условиями фурменных очагов. Средние значения коэффициентов корреляции по модулю в таблице следующие: расход дутья – 0,94; расход природного газа – 0,33; отношение расхода природного газа к дутью – 0,79; теоретической температуры горения – 0,78. Значение тесноты линейной взаимосвязи на уровне 0,79 ед. вполне пригодно для задач управления газодинамическими и тепловыми условиями фурменных очагов.

Ранее было обосновано, что согласование распределения дутья и природного газа по воздушным фурмам является необходимым для обеспечения равномерного движения шихтовых материалов по окружности доменной печи. После выравнивания температурного уровня фурменной зоны по окружности доменной печи при дальнейшем, например, снижении расхода природного газа, будет увеличиваться теоретическая температура горения, но одновременно ухудшатся газодинамические условия горения и уменьшаться количество водородных радикалов.

Учитывая вторичные причины снижения скорости горения кокса при увеличении теоретической температуры горения, можно заключить, что большее влияние на скорость горения кокса происходит за счет увеличения изменения газодинамических условий горения и количества свободных атомов и радикалов, чем изменения температуры фурменных очагов.

Расчет показал, что увеличение на 1,0% отношения расхода природного газа к дутью приводит к снижению теоретической температуры горения на 46°C . В диффузионной области реагирования по зависимости скорости горения углерода изменение температуры с 2000°C до 1954°C существенно не повлияло на удельную скорость горения кокса. В то же время, увеличение расхода природного газа составляет при этом $3,6\text{ м}^3$ при 20°C и 1 ат, что приносит $14,3\text{ м}^3$ радикалов и свободных атомов водорода, участвующих в горении кокса.

Таблица. Теснота линейной взаимосвязи расходов дутья и природного газа с показателями работы фурменных очагов

№ пп	Наименование показателя работы фурменных очагов	Коэффициент корреляции			
		Расход дутья, м ³ /мин при 20 ⁰ С и 1 ат	Расход природного газа, м ³ /мин при 20 ⁰ С и 1 ат	Отношение расхода природного газа к дутью, %	Теоретическая температура горения, ⁰ С
1	Скорость истечения газового потока на выходе из фурмы, м/с	1,00	0,36	-0,75	0,73
2	Плотность газо-воздушной смеси, кг/м ³	-0,75	0,29	1,00	-0,99
3	Динамическая вязкость газо-воздушной смеси, Па·с	0,75	-0,29	-1,00	0,99
4	Кинематическая вязкость газо-воздушной смеси, м ² /с	0,75	-0,29	-1,00	0,99
5	Число Рейнольдса газового потока на выходе из фурмы, ед.	1,00	0,38	-0,73	0,72
6	Коэффициент переноса окислителя через пограничный слой, м/с	1,00	0,34	-0,76	0,75
7	Скоростной напор газового потока на выходе из фурмы, Н/м ²	0,99	0,39	-0,68	0,67
8	Потеря давления на удар, Н/м ²	0,99	0,39	-0,68	0,67
9	Кинетическая энергия газового потока на выходе из фурмы, Дж	0,97	0,40	-0,63	0,62
10	Сила сопротивления газового потока на выходе из фурмы движению твердого тела, Н	0,99	0,37	-0,69	0,68
11	Сила тяжести с шихтовых материалов над вихреобразной областью горения, Н	1,00	0,29	-0,77	0,76
12	Объем фурменного очага, м ³	0,99	0,29	-0,74	0,74
13	Доля кислорода, окисляющего чугуна, %	0,99	0,21	-0,84	0,83

Снижение скорости взаимодействия радикалов и свободных атомов при уменьшении температуры на 46⁰С затрудняет возможность протекания других нежелательных реакций и процессов, описанных выше.

Однако высвобождение свободного объема в доменной печи за счет расходования кокса осуществляется не только благодаря его сжиганию и газификации у воздушных фурм, но также в немалой степени и путем восстановления оксидов железа и других веществ углеродом кокса, и за счет науглероживания чугуна. Причем по мере совершенствования доменной плавки значение восстановления оксидов и науглероживания чугуна в движении шихтовых материалов доменной печи увеличивается. Не

только потому, что относительное количество чугуна, выплавляемого из единицы объема шихтовых материалов, увеличивается [6], но и благодаря увеличению содержания углерода в чугуне.

Выводы.

1. С увеличением относительного количества природного газа на фурме скорость горения монооксида углерода и водорода должна увеличиваться, что способствует ускорению горения кокса в доменной печи, так как догорание первичного монооксида углерода тормозит непосредственное взаимодействие кислорода с твердым углеродом.
2. Реакции газификации углерода кокса диоксидом углерода и водяным паром в доменной печи протекают в кинетической и переходной областях реагирования. При этом на скорость взаимодействия можно влиять с помощью изменения температуры.
3. Для ровности схода материалов по окружности доменной печи необходима равномерность температурного уровня фурменных очагов, что приводит к более равномерному измельчению кокса при газификации.
4. Следует стремиться к установлению постоянства температурных условий фурменной зоны и наименьшего значения теоретической температуры горения газов в печи, что приводит к снижению скорости газификации углерода кокса, образования оксидов азота, атомарного азота, цианидов, окисления составляющих чугуна и возгонки оксидов шлака в фурменных очагах доменной печи.
5. При увеличении температуры фурменного очага происходит снижение скорости горения кокса за счет плавления золы кокса, так как ее температура плавления приблизительно равна 1600°C .
6. Графитизация кокса при замедлении движения шихты в какой-либо части печи по окружности приводит к еще большему задерживанию в нем схода материалов. Снижение рудной нагрузки в данной части окружности колошника приводит к увеличению температуры фурменных очагов, что может вызвать еще большее замедление схода шихты.
7. Способом, позволяющим достаточно надежно воздействовать на газодинамические и температурные условия газового потока в фурменном очаге, является изменение отношения расхода природного газа к расходу дутья по фурмам или доли природного газа по отношению к дутью.
8. Управление сходом материалов в доменной печи за счет распределения газового потока необходимо осуществлять после согласования распределения дутья и природного газа по воздушным фурмам. При дальнейшем изменении соотношения природного газа к дутью возникает большее влияние на скорость горения кокса за счет увеличения изменения количества свободных атомов и радикалов, чем температуры фурменных очагов.
9. По мере совершенствования доменной плавки значение восстановления оксидов и науглероживания чугуна в движении шихтовых материалов

доменной печи увеличивается, что обуславливает исследования в данном направлении.

1. *Можаренко Н.М., Параносенков А.А.* Исследование особенностей механизма горения кокса в доменной печи // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.* – Сб. научн. тр. ИЧМ. – Вып. 14. – 2007. – С. 84–94.
2. *Можаренко Н.М., Параносенков А.А., Загоровская Н.М.* Аналитическое исследование газодинамических условий горения кокса в доменной печи // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.* Сб. тр. ИЧМ. – Вып. 15. – 2007. – С. 67–76.
3. *Лавров Н.В., Шурыгин А.П.* Введение в теорию горения и газификации топлива. – М.: Изд. АН СССР, 1962. – 215 с.
4. *Чернов Н.Н.* Кинетические закономерности процесса горения углерода в доменной печи // *Металлургия и коксохимия.* – Выпуск 5. – Харьков: Изд. Харьковского университета, 1970. – 248 с.
5. *Журавский А.А., Слободской С.А., Торяник Э.И.* Исследование свойств кокса при частичной газификации // *Углекислотный журнал.* – 2001. – № 1–2. – С. 28–32.
6. *Лавров Н.В., Розенфельд Э.И., Хаустович Г.П.* Процессы горения топлива и защита окружающей среды. – М.: Металлургия, 1981. – 240 с.
7. *Отчет о НИР ИЧМ под рук. Некрасова З.И.* Опытная плавка в доменной печи объемом 2000 м³ Криворожского металлургического завода при одновременном применении отсортированного от мелочи прочного агломерата постоянного состава из концентратом Ново-Криворожского горно-обогатительного комбината, содержащих не менее 65 % железа, сырого природного газа, атмосферного дутья, нагретого до 1100–1200 °С и повышения давления газа на колшнике с работой доменной печи на установившемся режиме не менее одного месяца. – 1964. – 138 с. с приложениями.
8. *Металлургия чугуна:* Учебник. / Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев и др. – М.: Металлургия, 1978. – 480 с.

Статья рекомендована к печати канд. техн. наук А.Д. Джиготой