669.162.21:669.162.16

**А.Д.Джигота, Н.М. Можаренко, А.С.Нестеров, М.Г.Джигота**

# ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОКСА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

По результатам теоретического анализа и экспериментальных данных показано, что по мере ухудшения качества кокса в условиях доменной плавки возрастает степень отрицательного влияния его физико-механических и физико-химических свойств на протекание процессов.

**Постановка задачи.**

Одним из фундаментальных положений высокоэффективной работы доменной печи является условие поддержания ее ровного хода, под которым подразумевают стабильность газодинамического режима и устойчивого теплового состояния процесса. Поэтому на практике важнейшей задачей считается выполнение этих условий. Однако, в связи с тем, что в силу реальных технических и технологических причин обеспечить практически входные параметры (железорудное сырье, кокс, добавки, дутье и др.) стабильными не представляется возможным, эти обстоятельства приводят к тому, что, несмотря на значительный прогресс в совершенствовании технологии и подготовки шихтовых материалов в доменном производстве, восстановительная способность газов в печи используется недостаточно полно.

При этом характерным результирующим явлением переходных процессов может служить положение, согласно которому высокая интенсивность работы печи даже при незначительных колебаниях качества шихтовых материалов, нагрева, газораспределения нарушает устойчивость хода плавки, а, следовательно, и постоянство условий, соответствующих установленному режиму. Развитие этих процессов в нежелательном направлении, как правило, приводит к большим расстройствам хода доменной печи и является причиной ухудшения газодинамики процесса плавки, особенно в печах большого объема [1].

**Анализ состояния проблемы.**

Основным регулирующим агентом доменной шихты на всех горизонтах печи выступает кокс, который работает в очень жестких термохимических условиях, осложненных механическими воздействиями шихтовых материалов. Поэтому для успешного обеспечения этой работы доменный кокс должен обладать достаточно высоким уровнем физико-механических и физико-химических свойств [2-4].

Значительный мировой прогресс доменного производства в конце прошлого века был достигнут благодаря улучшению подготовки шихтовых материалов и особенно — улучшению качества кокса. Уровень

качества кокса, на котором работают доменные печи Западной Европы, Америки и Японии соответствует следующим кондициям [5-6]:

- CSR > 60%; CRI < 30%;
- $I_{40}^{(500\ об)}$ > 50%; $I_{10}$ < 19%;
- $M_{40}$ > 82,5%; $M_{10}$ < 8%;
- Зольность < 10,0%;
- Сернистость < 0,75%;
- Летучие < 1,0%;
- Влажность < 5,0%;
- Щелочи < 0,3%.

Работа доменных печей на таком коксе позволила использовать до 200 кг/т чугуна угольной пыли и получить удельный расход кокса < 350 кг/т чугуна.

Из основных функций кокса в доменном процессе (разрыхлитель, восстановитель и энергоноситель) в настоящее время наиболее важным являются первые две, которые обеспечиваются физико-механическими и физико-химическими свойствами кокса. Физико-механические свойства кокса характеризуются рядом показателей «холодной» и «горячей» прочности и обеспечивают в большей или меньшей мере, в зависимости от их уровня, сохранность геометрических форм кусков кокса в доменной печи вплоть до его сгорания в фурменном очаге. Физико-химические свойства кокса характеризуются показателями его реакционной способности и химической активности и проявляются в гетерогенных реакциях окислительно-восстановительных процессов доменной плавки, протекающих в высокотемпературной зоне печи, т.е. в заключительной стадии работы кокса. Целостность структуры куска кокса обусловливает общность его физико-механических и физико-химических свойств и предопределяет их проявление в конкретных технологических условиях. Так, более прочный кокс, как правило, имеет пониженную реакционную способность [7].

В последние годы значительно ухудшилось качество кокса (резко уменьшилась доля коксующихся углей, увеличилась продолжительность коксования), и возросла доля его в доменной шихте, что привело к нарушению установившихся ранее (при стабильном качестве кокса) закономерностей развития физико-химических процессов плавки и резкому ухудшению технико-экономических показателей работы доменной печи. Это вызвало необходимость уточнить влияние металлургических свойств кокса на параметры работы доменной печи в сложившихся условиях.

**Изложение основных материалов исследования.**

Общая тенденция улучшения качества кокса заключается в повышении однородности его гранулометрического состава и достаточной механической прочности для обеспечения

газопроницаемости доменной шихты. Основное требование к коксу как разрыхлителю шихтовых материалов сводится к соблюдению определенного состояния кокса по крупности. При этом крупностью кокса, загружаемого в печь, можно эффективно управлять. Однако этого недостаточно для обеспечения способности насыпных масс кокса противостоять разрушающему воздействию условий доменного процесса и сохранять достаточную крупность вплоть до сгорания в фурменном очаге.

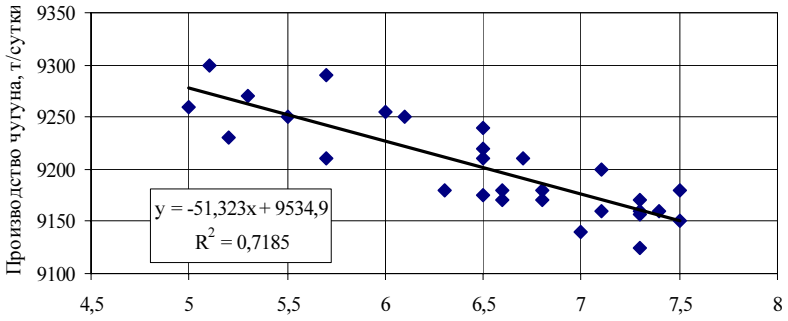
В выполненных в этом направлении исследованиях определяли влияние физико-механических свойств кокса при изменении его качества в широком диапазоне на удельный расход кокса и производительность доменной печи. Исследования проводили в два этапа: при уровне прочности кокса, характеризуемой стандартными параметрами $M_{25}$ и $M_{10}$, соответственно > 87,0 % и < 7,5 % (1-й уровень) и < 87,0 % и > 7,5 % (2-й уровень). Для анализа выбирали периоды работы доменных печей продолжительностью не менее 30 сут. Статистическую обработку экспериментальных данных проводили исходя из предположения о линейной взаимосвязи исследуемых параметров.

Результаты исследований (рис.1 и 2) показали, что при 1-м уровне прочности кокса ее изменение на ± 1 % по $M_{10}$ обусловливают влияние на удельный расход кокса и производительность доменной печи в пределах соответственно ± 0,6-0,65 % и ± 2,5-3,0 %. Это соответствует нормам влияния технологических факторов на технико-экономические характеристики работы печи по принятой методике анализа изменений удельного расхода кокса и производительности доменных печей.

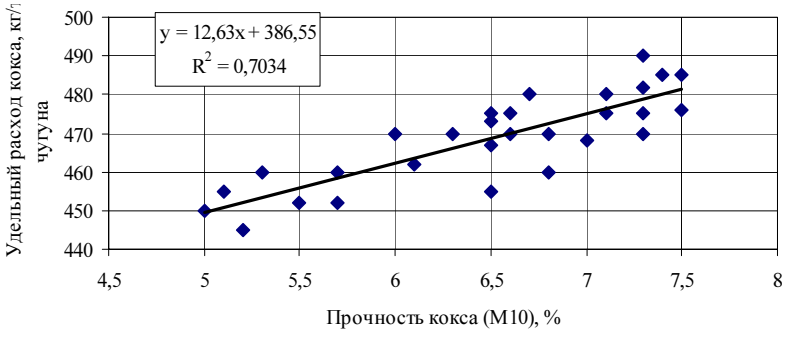
Анализ данных второго этапа исследования показал, что при пониженном уровне прочности кокса его параметры оказывают большее влияние на удельный расход кокса, чем на производительность печи, о чем свидетельствуют более высокие значения коэффициентов корреляции взаимосвязей. Так, изменение прочности кокса на 1 % по $M_{10}$ вызывает изменение (в среднем) удельного расхода кокса соответственно до 3,8 % и производительности печи — до 2,8 %. Вместе с тем, обработка данных выявила, что теснота взаимосвязей показателей $M_{25}$ и $M_{10}$ с технико-экономическими параметрами доменной плавки низкая, особенно на первом этапе, и проявляется в той мере, в какой показатели $M_{25}$ и $M_{10}$ отражают действительную термомеханическую прочность кокса. Тем не менее, полученные результаты свидетельствуют о существенном изменении характера влияния свойств кокса на параметры доменной плавки в широком диапазоне изменения его качества при уменьшении его прочности ниже порогового уровня (87,0 % по $M_{25}$ и 7,5 % по $M_{10}$).

По данным исследования можно отметить, что физико-механические свойства кокса изменяются в гораздо более широком диапазоне, чем это отражают стандартные параметры $M_{25}$ и $M_{10}$, особенно при снижении их уровня.

Сопоставление данных первого и второго этапов исследований показывает, что степень влияния на технико-экономические показатели работы печи стандартных параметров прочности кокса $M_{25}$ и $M_{10}$ повышается по мере снижения его прочности. При повышении уровня прочности кокса > 89,5 по $M_{25}$ и < 6,0 по $M_{10}$ его прочность не влияет на работу доменной печи, при снижении уровня прочности по $M_{25}$ < 87,0 и $M_{10}$ > 7,5 убытки доменного производства возрастают более чем в 2 раза.



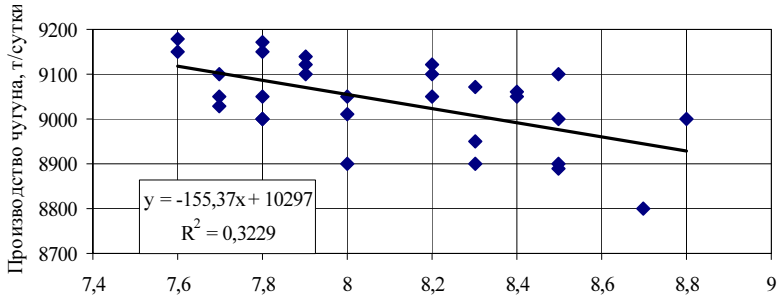

а)



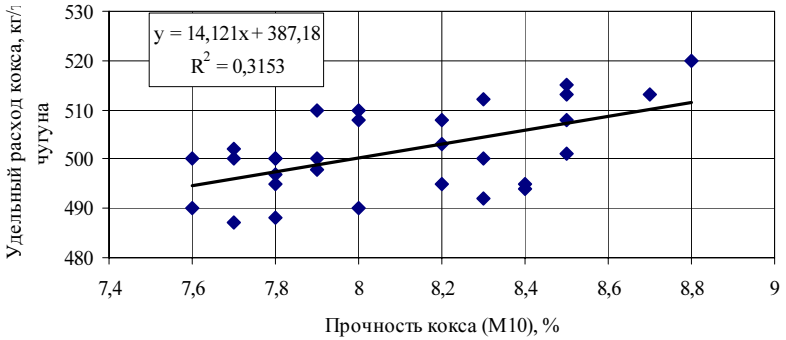

б)

Рис.1. Зависимость производительности доменной печи (а) и удельного расхода кокса (б) от его прочности $M_{10}$ (в диапазоне - < 7,5).

Таким образом, при ухудшении физико-механических свойств кокса степень их влияния на основные технико-экономические показатели работы доменной печи возрастает (более резко повышается удельный расход кокса на выплавку чугуна и снижается производительность печи).




а)




б)

Рис.2. Зависимость производительности доменной печи (а) и удельного расхода кокса (б) от его прочности $M_{10}$ (в диапазоне - > 7,5).

Особое место в горне доменной печи занимает процесс взаимодействия газовой фазы с коксом, в котором главным образом проявляются его физико-химические свойства. В этом процессе кокс является активным реагентом, а его реакционные свойства являются переменным фактором, который предопределяет как развитие процессов массообмена, так и конечные результаты. Так, промежуточные продукты распада углеводородов топливных добавок, выйдя из окислительной зоны, имеет дело с коксом, нагретым до $t^o > 1300^0$С. Характер их взаимодействия возможен как аллотермический, когда требуемое для эндотермических реакций тепло потребляется от раскаленного кокса, так и автотермический, при котором требуемое тепло поступает от

экзотермических реакций многостадийного процесса. Конечные результаты по составу газовой фазы зависят от организации соответствующих условий протекания процесса. Так, повышению содержания в газовой фазе CO и $H_2$ содействуют высокая температура процесса и химическая активность кокса, а также наличие катализаторов.

Исследование физико-химических характеристик кокса на различных стадиях его прохождения от коксортировки до горна доменной печи показали, что основные изменения вещественной органической структуры кокса происходят в высокотемпературной зоне. Так, фурменный кокс имеет следующие изменения показателей: истинная плотность больше в 1,11–1,21 раза; кажущаяся плотность практически на уровне значений у кокса, загружаемого в печь; пористость изменяется соответственно истинной плотности; величина удельной поверхности больше в 1,3–1,6 раза; реакционная способность больше в 3,5 – 8,7 раза; горючесть больше в 1,2–1,4 раза. При этом кокс более высокого качества значительно лучше противостоит этим изменениям.

Анализ экспериментальных данных показывает, что отклонение показателей свойств кокса от исходного уровня тем больше, чем больше кокс отличается от кокса высокого качества. Особое место занимает значительное изменение реакционной способности кокса по отношению к $CO_2$. Специальные экспериментальные исследования показали, что это обусловлено катализирующим влиянием металлов и особенно (~85%) влиянием щелочных металлов. Так, в лабораторном эксперименте, моделирующем условия фурменного очага (по температуре и составу газовой фазы) получали степень модификации поверхности обычного кокса, соответствующую кондициям фурменного кокса, воздействием паров щелочных металлов.

При использовании различного топлива (природный газ, уголь, ЖЗК) в качестве топливных добавок к дутью, особенно важную роль в обеспечении полноты их сгорания играет качество подготовки топлива к сжиганию и характер протекания термодинамических процессов в горне доменной печи. В результате исследований получены данные, показывающие, что поступательное движение кокса в фурменную зону сопровождается непрерывным изменением реагирующей поверхности в процессе угара кусков (таблица). В зоне циркуляции, при прочих равных условиях, всегда находится такое количество кокса, суммарная поверхность которого поддерживается постоянной в конкретных макроусловиях за счет установившегося непрерывного поступления сверху новых кусков. Экстенсивными факторами в горне является объем, а сама скорость определяется количеством вещества, реагирующего за единицу времени в единице объема. В то же время, такой же экстенсивной величиной, характеризующей развитие гетерогенной реакции, является поверхность твердой фазы, т.е. фактически физико-химические свойства кокса.

Таблица. Характеристика изменения геометрии кусков кокса в зависимости от степени их угара.

| Класс крупности, мм | Угар, % | Остаток исходного класса, % | Средний диаметр, мм | Суммарная поверхность, $м^2/кг$ |
|---|---|---|---|---|
| 25 – 40 | 10<br>20 | 90,4<br>85,2 | 31,0<br>30,3 | 3,6<br>4,0 |
| 40 – 60 | 10<br>20 | 93,0<br>89,5 | 47,5<br>44,0 | 3,0<br>3,3 |
| 60 – 80 | 10<br>20 | 88,5<br>83,5 | 63,2<br>58,5 | 2,5<br>2,8 |
| + 80 | 10<br>20 | 84,0<br>79,5 | 83,3<br>75,8 | 2,3<br>2,8 |

**Выводы.** По мере ухудшения качества кокса в условиях доменной плавки возрастает степень изменения его физико-механических и физико-химических свойств и уровень их отрицательного влияния на протекание процессов. При этом усиливается деградация кусков кокса, разрыхление и разупрочнение их поверхности и, как следствие, ухудшение дренажа жидких продуктов плавки, накопление «мусора», растягивание зоны вязкопластичного состояния и т.п.


1. *Овчинников Ю.Н.,* Мойкин В.И., Спирин Н.А. и др. Нестационарные процессы и повышение эффективности доменной плавки. // М.: Металлургия, 1989. – 120с.
2. *Можаренко Н.М.,* Джигота А.Д. Физико-химические основы метода оценки горючести кокса. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. трудов ИЧМ. –1998. – Вып. 2. – С. 88 – 93.
3. *Джигота А.Д.*, Можаренко Н.М., Москалина Ф.Н. и др. Влияние уровня прочности кокса на показатели работы доменной печи. / Металлург. – 1997. – №2. – С. 18 – 19.
4. *Можаренко Н.М.,* Джигота А.Д. Роль и поведение кокса в высокотемпературной области доменной печи при использовании топливных добавок. / Углехимический журнал. – 2002. – №3–4. – С. 25 – 28.
5. *Требования* европейских доменщиков к качеству кокса. // Реф. Г.С. Ухмыловой. / Кокс и химия. – 2001. №4. – С. 24 – 26.
6. *Требования* к качеству кокса в Северной Америке. // Реф. Г.С. Ухмыловой. / Кокс и химия. – 2001. – №6. – С. 28 – 29.
7. *Улановский М.Л.,* Мирошниченко Д.В. Разработка и апробация математических моделей реакционной способности и термомеханической прочности кокса. / Углехимический журнал. – 2005. – №1–2. – С. 49 – 54.


*Статья рекомендована к печати д.т.н. А.В.Бородулиным*