

УДК 669.162.2:669.16:621.745.551

О.В.Кукса, Н.М.Можаренко, Э.И.Лытарь,
В.В.Горупаха, Н.М.Загорская

**ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ,
ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ДОСТИЖЕНИЕ ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ
НАУГЛЕРОЖИВАНИЯ ЧУГУНА**

Институт черной металлургии НАН Украины

В результате проведенных исследований установлено, что наиболее значимыми факторами, влияющими на содержание углерода в чугуне, являются содержание кремния, марганца и серы в чугуне, технологические параметры дутья и интегральные характеристики шлака. Для условий ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» получена зависимость, которая рекомендуется для расчета фактического содержания углерода в чугуне.

Ключевые слова: доменная печь, науглероживание чугуна, зависимость

Современное состояние вопроса. В теории доменного процесса долгое время признавалась невозможность управления науглероживанием чугуна в доменной печи [1]. Дальнейшее развитие изучения вопроса науглероживания чугуна в доменной печи позволило выявить, что содержание углерода в чугуне при современных условиях доменной плавки главным образом зависит от ее параметров, наиболее значимые из которых приведены в формуле (1) [2-3]. Было высказано предположение о том, что, изучив механизм влияния параметров плавки на растворение углерода в чугуне, можно было бы управлять или, по крайней мере, оперативно контролировать эффективность управляющих воздействий на процессы тепло-массообмена в доменной печи, определяющие степень науглероживания чугуна.

Попытка оценить влияние параметров доменной плавки на содержание углерода в чугуне была проведена в условиях металлургического комбината "Азовсталь" [3]:

$$[C] = 3,908 - 0,00329 \cdot f + 0,000545 \cdot t_d - 0,0745 \cdot n, \quad (1);$$

где f – влажность дутья, г/м³; t_d – температура дутья, °С; n – число выпусков в сутки.

В работе [4] была получена аналогичная зависимость (2). Из выводов данной работы следовало, что первым по значимости фактором, влияющим на содержание углерода в чугуне, является количество выпусков чугуна:

$$[C] = 4,0017 + 0,00535f + 0,000368t_d - 0,01932n, \quad (2);$$

где f – влажность дутья, г/м³; t_d – температура дутья, °С; n – число выпусков в сутки.

Как следует из представленной зависимости, повышение влажности дутья увеличивает содержание углерода в чугуне из-за развития реакции науглероживания железа из газовой фазы и торможения процессов выгорания углерода в фурменных очагах доменной печи. Третьим фактором по степени воздействия на процесс науглероживания чугуна была определена температура дутья, с увеличением которой содержание углерода в чугуне также повышается за счет увеличения растворимости углерода в чугуне, что объясняется повышением интенсивности тепло-массообменных процессов в коксовой насадке, повышением теплового потенциала горна и увеличением науглероживания железа из газовой фазы печи.

Наиболее подробный анализ существующих зависимостей как фактического, так и равновесного (насыщенного) содержания углерода в чугуне (всего 11 зависимостей) был проведен сотрудниками ИЧМ [6], согласно которому прогнозирование фактического содержания углерода в чугуне ограничивалось составом чугуна. Таким образом, большинство известных моделей содержания углерода в чугуне основаны на статистическом анализе состава чугуна, по его основным элементам [Si], [Mn], [S], [P]. Их различие заключается лишь в разных массивах технологических данных. Подобные зависимости могут быть использованы, как альтернатива замерам фактического содержания углерода в чугуне. Однако следует признать, что наибольшая корректность модельного расчета содержания углерода в чугуне достигается при использовании данных, полученных во время периода стабильной работы доменной печи, без значительных изменений в технологии доменной плавки и шихтовых условий.

Цель работы. Поиск оптимальных условий доменной плавки, обеспечивающих достижение высокой степени науглероживания чугуна.

Изложение основных материалов исследования. В результате наших исследований было установлено, что наряду с созданием благоприятных условий службы углеродистой футеровки горна и лещади доменной печи при $C/C_{\text{нас}} > 0,94$ дополнительно создаются условия для интенсивного обессеривания чугуна [7]. С момента снижения $C/C_{\text{нас}}$ ниже значения 0,97 рекомендовалось отслеживать уровень теплового состояния горна доменной печи с целью улучшения условий науглероживания чугуна и сохранения углеродистой футеровки. Принятие управляющего воздействия рекомендуется осуществлять в диапазоне $C/C_{\text{нас}}$ 0,94–0,97.

В работе [8] также был сделан вывод о том, что для условий ДП № 9 ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог» нижним допустимым пределом $C/C_{\text{нас}}$ является значение 0,94. Учитывая, что при повышении $C/C_{\text{нас}}$ значительно увеличивается коэффициент распределения серы в чугуне L_s и уменьшается содержание серы в чугуне, поддержание $C/C_{\text{нас}}$ на уровне, близком к насыщенному, в большей степени зависит от экономической

целесообразности данной меры, поскольку требует дополнительного нагрева доменной печи.

Задача нахождения оптимального режима доменной печи зависит от большого числа различных факторов, значительная часть которых неразрывно связана с тепловым состоянием доменной печи. В качестве индикатора теплового состояния доменной печи обычно используется кремний чугуна.

В целом, изменение содержания кремния и углерода в чугуне проходит согласованно. Однако, сначала взаимосвязь содержания кремния и углерода в чугуне является прямой (при $[Si] < 0,8$), так как на первом этапе плавки содержание углерода в чугуне далеко до насыщенного состояния, и позитивное влияние роста температуры на содержание углерода в чугуне является преобладающим. При этом содержание кремния в чугуне также увеличивается. Далее, при $[Si] \approx 0,7 - 0,8\%$ содержание углерода в чугуне приближается к насыщенному настолько, что дальнейший разогрев значительного влияния на содержание углерода в чугуне не оказывает.

Исследователи [9] отмечают, что $[C]_{\text{факт.}}$ и $C/C_{\text{нас.}}$ реагируют на похолодание в среднем на один выпуск раньше, чем содержание кремния и температура чугуна. При этом степень насыщения чугуна углеродом имеет преимущество перед фактическим содержанием углерода в чугуне, так как является комплексным показателем, учитывающим температуру и состав чугуна. Также исследователи [9] отмечают, что взаимосвязь углерода и кремния в чугуне имеет вид параболы (рис.1), в то время, как ранее многие исследователи утверждали прямой или обратный характер этой зависимости, что свидетельствует о соответствующей ветви параболы, характеризующей рабочий режим печи.

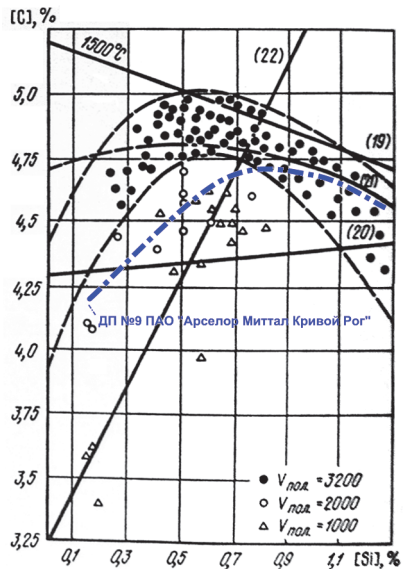


Рис.1. Связь содержания кремния и углерода в передельном чугуне

По нашему мнению в верхней части представленной на рис.1 параболы создаются наиболее благоприятные условия работы доменной печи. Нахождение этого оптимума для конкретной доменной печи означает не только обеспечение нормальной эксплуатации углеродистой

футеровки доменной печи, но и значительное снижение содержания серы в чугуне. Например, для условий ДП № 9 ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог» этот оптимум смещается правее, имея вид прямой связи до значений $[Si] \approx 0,9$, а правая часть параболы лишь незначительно приобретает вид обратной связи (рис.1).

Задача прогнозирования $[C]$ усложняется тем, что в оптимальной области работы доменной печи парная взаимосвязь между углеродом и кремнием может значительно снижаться, из-за чего точность прогнозных моделей фактического содержания чугуна также снижается. В целом, моделирование фактического содержания углерода в чугуне позволяет определить $[C]$ лишь на качественном, а не количественном уровне.

Анализ различных массивов данных за различные периоды времени нескольких доменных печей Украины показал, что парная взаимосвязь между фактическим содержанием углерода и фосфора в чугуне практически отсутствует (табл.1–2). Также весьма низкой является парная корреляционная связь между $[C]$ и температурой чугуна $T_{чуг.}$ ($r \approx 0,07 - 0,15$).

Например, для ПАО "ЕМЗ" характерны следующие зависимости:
ДП № 3 (515 плавков):

$$C = 4,77 + 0,3[Si] - 0,037[Mn] - 8,02[S] \quad (r = 0,545) \quad (3);$$

ДП № 5 (827плавков):

$$C = 4,54 + 0,355[Si] + 0,164[Mn] - 6,07[S] \quad (r = 0,52) \quad (4);$$

При учете влияния химического состава шлака для обеих печей точность регрессионной модели увеличилась до $r = 0,6$:

$$[C] = 4,6 + 0,465[Si] + 1,21[Mn] - 6,65[S] + 0,0033(SiO_2) + 0,15(MnO) - 0,29(S) \quad (5)$$

При добавлении в зависимости (3-4) $[P]$ и $T_{чуг.}$ коэффициент корреляции регрессионных моделей увеличился лишь на 0,005 и 0,001 соответственно. Определенное повышение точности прогноза обеспечивает использование технологических параметров доменной плавки или интегральных характеристик шлака. Учитывая, что химический состав шлака измеряется для каждого выпуска чугуна, использование интегральных характеристик шлака наиболее целесообразно. Наиболее значимым при этом является параметр Z^y шлака, рассчитанный по модели разупорядоченной системы [10].

Так, для условий ДП № 9 ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог» получена следующая зависимость ($r = 0,72$):

$$[C] = 2,745 + 0,18[Si] + 0,36[Mn] - 0,744[S] + 0,0026R_{pg} \quad (10);$$

где: R_{pg} – расход природного газа, составляющий в среднем 518 м³/мин, при среднем расходе дутья 7164 м³/мин.

Таблица 1. Парные корреляционные связи между фактическим содержанием углерода [C] и химическим составом чугуна и шлака (ДП №3, №5 ПАО «ЕМЗ»)

№	Название	[C], ДП №3	[C], ДП №5
1	[Si]	0,34	0,265
2	[Mn]	0,175	0,23
3	[S]	-0,39	-0,49
4	[P]	0,14	0,08
5	(SiO ₂)	-0,05	-0,14
6	(Al ₂ O ₃)	0,14	0,027
7	(CaO)	0,0001	0,01
8	(MgO)	0,05	0,15
9	(MnO)	-0,08	-0,11
10	(FeO)	0,026	0,05
11	(S)	-	-0,2

Таблица 2. Парные корреляционные связи между фактическим содержанием углерода [C] и химическим составом чугуна и шлака, а также технологическими показателями доменной плавки (ДП № 9 ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог»)

№	Название	[C]
1	[Si]	0,60
2	[Mn]	0,15
3	[S]	-0,45
4	[P]	-0,10
5	Содержание в дутье O ₂ , %	0,11
6	Расход природного газа, м ³ /мин	0,39
7	Расход дутья, м ³ /мин	0,35
8	Температура дутья, °C	-0,12
9	Давление дутья, атм	0,13
10	Влажность дутья, %	0,03
11	Давление колошникового газа, атм	0,13
12	(SiO ₂)	-0,24
13	(Al ₂ O ₃)	0,53
14	(CaO)	0,24
15	(MgO)	0,15
16	(MnO)	-0,47
17	(FeO)	-0,24
18	(S)	0,47

При использовании параметра Z^y шлака, рассчитанного по модели разупорядоченной системы, точность модели увеличилась до $r = 0,78$:

$$[C] = 1,4 + 0,167[Si] + 0,34[Mn] - 0,40[S] + 1,04Z^y_{\text{шл}} + 0,0027R_{\text{pg}} \quad (11);$$

Полученная точность модели позволяет рекомендовать ее для оценки содержания углерода в чугуне в случае отсутствия его соответствующих замеров.

Выводы.

1. Наиболее значимыми факторами, влияющими на содержание углерода в чугуне, являются содержание кремния, марганца и серы в чугуне, технологические параметры дутья и интегральные характеристики шлака.

2. Для расчета фактического содержания углерода в чугуне [C] в условиях ДП №9 ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог» рекомендуется зависимость (11).

1. *Павлов М.А.* *Металлургия чугуна.* – М. *Металлургиздат*, 1949. – 628 с.
2. *Металлургия чугуна: Учебник / Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев и др.* – М. *Металлургия*, 1989. – 512 с.
3. *Металлургия чугуна: Учебник / Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев и др.* – М. *Металлургия*, 1978. – 480 с.
4. *Можаренко Н.М., Параносенков А.А., Загоровская Н.М.* Влияние параметров доменной плавки на процессы растворимости углерода в чугуне. Сб. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*, вып. 11. – Днепропетровск: *Визион*, 2005, –С. 21–26.
5. Влияние производительности доменной печи на продолжительность ее кампании // *Новости черной металлургии за рубежом.* – 2005. – №1. – С.21–24
6. *Можаренко Н.М., Параносенков А.А., Тогобцикая Д.Н., Панчоха Г.В.* К вопросу определения насыщения углеродом передельного чугуна доменной плавки / // Сб. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*, вып. 8. – Днепропетровск: *Визион*, 2004.
7. *Кукса О.В., Можаренко Н.М., Лытарь Э.И., Загоровская Н.М.* Влияние совместного науглероживания и обессеривания чугуна на его качество. // Сб. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*, вып. 26. – Днепропетровск: *Визион*, 2012. –С. 130–137.
8. *Можаренко Н.М., Параносенков А.А., Панчоха Г.В., Орел Г.И., Оторвин П.И., Листопадов В.С., Дмитренко К.А.* Взаимосвязь степени насыщения чугуна углеродом и разгара футеровки металлоприемника доменной печи. // Сб. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*, вып. 12. – Днепропетровск: *Визион*, 2006. –С. 77–84.
9. *Юсфин Ю.С., Альтер М.А., Литвиненко Ю.А.* Науглероживание железа в современных доменных печах. // *Сталь.* – 1986. – №5. – С. 7–11.
10. *Приходько Э.В.* *Металлохимия многокомпонентных систем /* – М. : *Металлургия*. 1995. – 320 с.

*Статья рекомендована к печати
д.т.н., проф. Тогобцикой Д.Н.*

*О.В.Кукса, М.М.Можаренко, Е.І.Литарь, В.В.Горунаха,
Н.М.Загоровська*

Пошук оптимальних умов доменної плавки, що забезпечують досягнення високого ступеня науглецювання чавуну

У результаті проведених досліджень встановлено, що найбільш значущими факторами, що впливають на вміст вуглецю в чавуні, є вміст кремнію, марганцю і сірки в чавуні, технологічні параметри дуття і інтегральні характеристики шлаку. Для умов ДП № 9 ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг» отримано залежність (11), що рекомендується для розрахунку фактичного вмісту вуглецю в чавуні.

Ключові слова: доменна піч, науглецювання чавуну, залежність

*O.V.Kuksa, N.M.Mozharenko, E.I.Lytar, V.V.Gorupaha,
N.M.Zagorovskaya*

The search for optimal conditions of blast furnace smelting, ensuring the achievement of a high degree of carburization of iron

A result of research found that the most significant factors influencing the content of carbon in the iron content are silicon, manganese and sulfur in the iron blast process parameters and the integral characteristics of the slag. For conditions of blast furnace №9 PJSC "ArcelorMittal Kryvyi Rih" found the dependence (11), which is recommended for the calculation of the actual content of carbon in the iron.

Keywords: blast furnace, carburization of iron, the dependence