

О.В.Кукса, Н.М.Можаренко, Э.И.Лытгарь, Н.М.Загоровская

ВЛИЯНИЕ СОВМЕСТНОГО НАУГЛЕРОЖИВАНИЯ И ОБЕССЕРИВАНИЯ ЧУГУНА НА ЕГО КАЧЕСТВО

Исследована взаимосвязь процессов совместного науглероживания и обессеривания чугуна на примере промышленных данных ДП №9 ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог». Предложены пределы критерия $C/C_{нас}$, которые создают благоприятные условия для сохранения углеродистой футеровки доменной печи и обессеривания чугуна. Показано, что при снижении $C/C_{нас}$ менее 0,97 необходимо отслеживать уровень теплового состояния горна доменной печи с целью улучшения условий науглероживания чугуна и сохранения углеродистой футеровки. Принятие управляющего воздействия рекомендуется осуществлять в диапазоне $C/C_{нас}$ 0,94–0,97.

Доменная печь, углеродистая футеровка горна, обессеривание чугуна, растворимость углерода в чугуне, критерий

Современное состояние вопроса. Необходимость перехода доменных печей Украины на ограничение или полный отказ от использования природного газа и одновременно с этим резкое снижение качества украинского кокса предопределило изменение условий протекания процессов формирования химического состава продуктов плавки и взаимодействия их с углеродистой футеровкой горна и лещади. Эти изменения связаны с повышением зольности кокса, ухудшением его гранулометрического состава и, особенно, со снижением горячей прочности и увеличением реакционной способности, что в значительной мере изменило развитие газодинамических, температурно-тепловых и восстановительных процессов по высоте доменной печи.

Растворимость углерода в чугуне изменяется в зависимости от свойств углеродсодержащего материала и растёт в следующей последовательности: антрацит, природный графит, искусственный графит, пековый кокс [1]. Углеродистые футеровочные блоки состоят в основном из антрацита и пекового кокса. Последний наименее устойчив, т.е. наиболее растворим в чугуне. Поэтому футеровка горна требует создания температурно-тепловых условий, тормозящих процесс растворения её углерода, т.е. эффективной комплексной защиты с постоянным контролем остаточной толщины слоя футеровки. Из анализа экспериментальных данных [1–4] следует, что растворимость углерода в железоуглеродистом расплаве определяется как свойствами углеродистых огнеупоров, так и химическим составом расплавов, в частности начальным содержанием в них углерода.

Растворение углерода расплавом можно разделить на два этапа: первый – растворение за счёт контакта с поверхностью углеродсодержащего материала и второй – диффузия растворённого углерода во внутренний объём расплава. Градиент концентраций углерода между границей разде-

ла фаз огнеупор-расплав и внутренним объемом расплава, инициирующий процесс растворения углерода из углеродсодержащего огнеупора, непрерывно уменьшается в результате увеличения в нём концентрации углерода. Вследствие этого металло-шлаковый расплав, стекающий из зоны когезии в горн, насыщается углеродом коксовой насадки настолько, чтобы его содержание в расплаве находилось на уровне, близком к предельному насыщению.

Условием высокой интенсивности массообмена в коксовой насадке является плёночный режим контакта стекающего расплава с внутренней поверхностью коксовой насадки. Удельная поверхность плёнок металло-шлакового расплава, стекающих по кускам кокса на 3-3,5 десятичных порядков выше, чем для его капель. Поэтому полнота завершения процессов массообмена для плёнок близка к 1 [5]. Увеличение площади плёночного контакта металло-шлакового расплава с поверхностью кусков кокса способствует интенсификации процесса науглероживания расплава на её поверхности. Как следствие, достигается сближение значений фактической и равновесной концентраций углерода в чугуна, а также снижение его способности растворять углеродистую футеровку металлоприёмника и лещади, стойкость которой, как показывает практика, во многом определяет продолжительность кампании доменной печи.

Исходя из данных, полученных в результате опытов, выполненных компанией–изготовителем углеродистых огнеупоров SGL CARBON, факторы негативного воздействия на футеровочные блоки, расположенные в нижней части доменной печи по увеличению степени их важности представлены в табл.1 [1].

Таблица 1. Ряд негативного влияния факторов и уровень их воздействия на углеродистые огнеупоры футеровки горна доменной печи

Вид воздействия	Степень важности
Высокая температура	-
Термические напряжения	-
Тепловые напряжения	-
Реакция со щелочами	?
Проникновение жидкой фазы	+
Окисление водой из протечек	++
Выделение углерода из–за распада CO	++
Взаимодействие с жидким чугуном	++
Ошибки конструкции	+++
Неровный ход печи	+++

- отсутствие негативного влияния;
- ? как позитивное, так и негативное влияние;
- + малое негативное влияние;
- ++ негативное влияние;
- +++ высокая степень негативного влияния.

Высокая степень воздействия таких факторов, как недостатки конструкции и неровный ход печи – прерогатива конструкторов и технического персонала доменного цеха. Среди трёх факторов, равнозначных по степени негативного влияния – окисление водой из протечек при нарушениях в системе охлаждения; выделение углерода из-за разложения CO по реакции $2\text{CO} \rightarrow \text{C} + \text{CO}_2$ и взаимодействие с жидким чугуном (химическое – коррозия и механическое – эрозия), – наименее изученным остаётся взаимодействие углеродистого огнеупора с жидким чугуном. Причём уровень воздействия зависит от степени насыщения чугуна углеродом, что также является предметом рассмотрения настоящего исследования.

Постановка задачи. Учитывая важность осознанного и обоснованного понимания процессов науглероживания и обессеривания чугуна в новых условиях, актуальным становится обеспечение устойчивых температурно-тепловых, химических и физических процессов, обеспечивающих минимальное негативное влияние на футеровку горна. Не менее актуальным является определение закономерностей развития процесса доменной плавки, позволяющих получить чугун, соответствующий стандарту предприятия, в частности по содержанию серы в чугуне.

Цель работы. Исследовать взаимосвязь процессов совместного науглероживания и обессеривания чугуна и определить пределы критерия $\text{C}/\text{C}_{\text{нас}}$ для ДП №9 ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог», которые создают оптимальные условия для сохранения углеродистой футеровки доменной печи.

Изложение основных материалов исследования. Так как основная причина вывода доменной печи из эксплуатации – неудовлетворительное состояние углеродистой огнеупорной футеровки в горне, для продления межремонтного периода и предотвращения аварийных ситуаций необходим постоянный мониторинг эксплуатационного состояния горна, в особенности остаточной толщины слоя углеродистой футеровки, и своевременное принятие мер для сохранения целостности огнеупорных изделий.

Ранее выполненными исследованиями установлено, что критерий $\text{C}/\text{C}_{\text{нас}}$ [6] может стать индикатором активности разрушения углеродистой футеровки [7]. Растворение углерода в чугунах и других расплавах на основе железа происходит с заметной скоростью вплоть до насыщения этих расплавов по углероду и определяется как составом и свойствами углеродистых огнеупоров, так и составом и температурой расплавов [7].

В многофакторной специфике доменной плавки показатель $\text{C}/\text{C}_{\text{нас}}$ – один из важных технологических критериев, применение которого является особенно эффективным в случае необходимости срочного принятия управляющего воздействия, предотвращающего дальнейшее нарушение нормального температурно-теплового процесса плавки.

Для расчёта $\text{C}_{\text{нас}}$ используется формула Б.П. Бурылёва, которая даёт наилучшую сходимость расчётных и экспериментальных данных в условиях ДП №9 ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог»:

$$C_{\text{нас}} = 1,34 + 0,00254T_{\text{чугуна}} - 0,3[\text{Si}] + 0,027[\text{Mn}] - 0,35[\text{P}] - 0,2[\text{S}] \quad (1)$$

Регулярное определение содержания углерода в чугуне позволяет оценивать динамику изменения критерия $C/C_{\text{нас}}$ с высокой достоверностью, достаточной для того, чтобы поддерживать необходимое тепловое состояние горна с недопущением активной эрозии углеродистой футеровки доменной печи. Например, на ДП №9 в составе АСУ ТП эксплуатируется подсистема «Горн», в которой технологический критерий $C/C_{\text{нас}}$ выполняет роль индикатора теплового состояния горна доменной печи. Как показал анализ текущих данных работы печи, значения концентрации углерода и серы в чугуне находятся в обратной пропорциональной зависимости. Особенно отчетливо эта связь прослеживается при рассмотрении взаимосвязи коэффициента распределения серы L_S и технологического критерия $C/C_{\text{нас}}$ (рис.1-6).

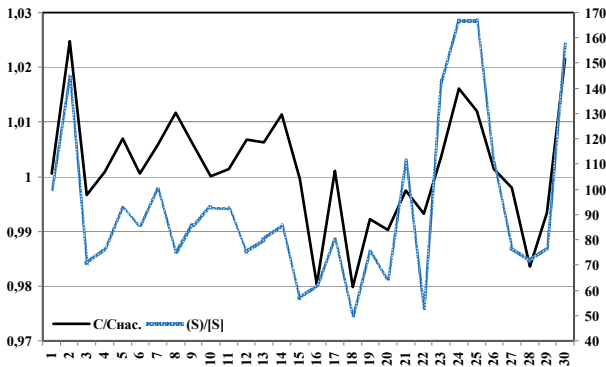


Рис.1. Динамика изменения технологических параметров $C/C_{\text{нас}}$ и коэффициента распределения серы L_S для ДП №9 ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог», массив 1.

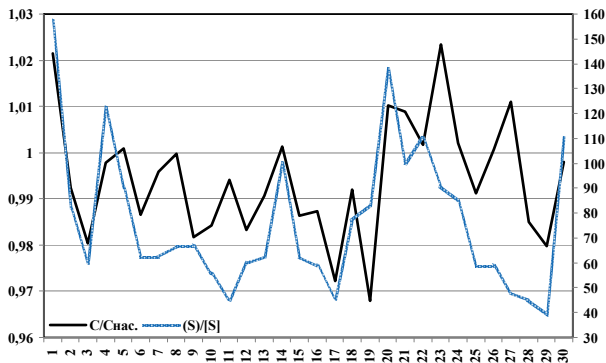


Рис.2. Динамика изменения технологических параметров $C/C_{\text{нас}}$ и коэффициента распределения серы L_S для ДП №9 ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог», массив 2.

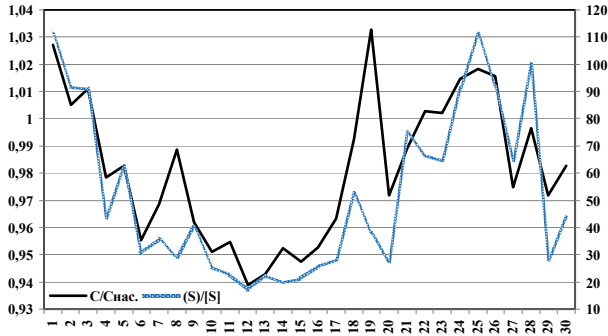


Рис.3. Динамика изменения технологических параметров $C/C_{нас}$ и коэффициента распределения серы L_S для ДП №9 ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог», массив 3.

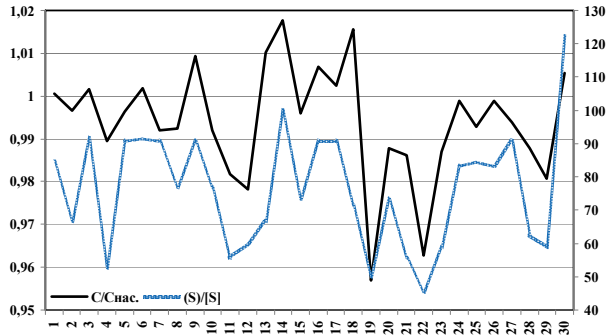


Рис.4. Динамика изменения технологических параметров $C/C_{нас}$ и коэффициента распределения серы L_S для ДП №9 ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог», массив 4.

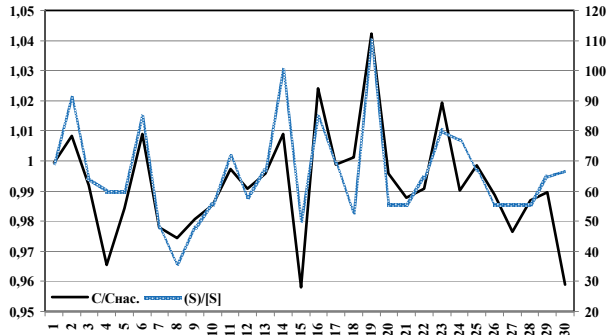


Рис.5. Динамика изменения технологических параметров $C/C_{нас}$ и коэффициента распределения серы L_S для ДП №9 ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог», массив 5.

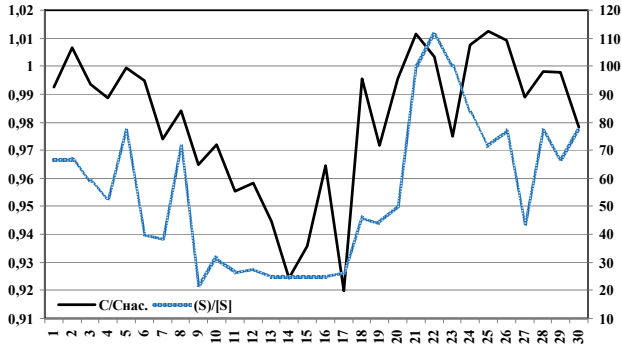


Рис.6. Динамика изменения технологических параметров $C/C_{\text{нас}}$ и коэффициента распределения серы L_S для ДП №9 ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог», массив 6.

После анализа технологических данных плавки чугуна за 3 месяца, для исследований были выбраны 6 массивов по 30 текущих плавки за 3-4 дня. Как видно из табл.2, среднесуточные показатели $C/C_{\text{нас}}$ для шести представленных в статье массивов, находятся на высоком уровне ($>0,98$).

Таблица 2. Средние значения содержания серы, углерода и кремния (масс%) для 6 технологических массивов данных ($T_{\text{чугуна ср.}} \approx 1450 \text{ }^\circ\text{C}$)

№	[S]	(S)	L_S	[C]	$[C]_{\text{нас}}$	$C/C_{\text{нас}}$	[Si]
1	0,0138	1,15	92,54	4,71	4,70	1	1,004
2	0,0145	1,00	76,74	4,72	4,75	0,994	0,863
3	0,0245	0,98	52,40	4,66	4,75	0,98	0,830
4	0,0143	1,04	76,38	4,68	4,71	0,994	0,974
5	0,0160	1,01	65,85	4,66	4,70	0,993	1,020
6	0,0230	1,03	55,05	4,65	4,74	0,981	0,880

На рис.3 и 6 выбраны моменты, когда $C/C_{\text{нас}}$, L_S и $[Si]$ заметно снижались на некоторое время по сравнению с остальными 4 типичными периодами работы доменной печи. Пример управляющего воздействия приведен на 3 массиве плавки (рис.3). На некоторое время основные показатели доменной плавки вышли из оптимального диапазона – произошло снижение коэффициента распределения серы L_S до значений менее 30, $C/C_{\text{нас}}$ – до уровня 0,94, а $[Si]$ до значений менее 0,5%. Подобные изменения косвенно свидетельствуют о дефиците тепла в горне доменной печи. После принятия управляющего воздействия технологические показатели доменной плавки приблизились к оптимальному диапазону.

По 6 массивам данных, представленных на рис. 1-6, коэффициент парной связи между $C/C_{\text{нас}}$ и L_S изменяется в диапазоне 0,45–0,8 и в среднем составил 0,6. Как видно из рис. 1-6, технологический показатель

$C/C_{\text{нас}}$ качественно связан с коэффициентом распределения серы L_s , что также косвенно подтверждает целесообразность регулярного мониторинга критерия $C/C_{\text{нас}}$. Как видно из рис. 3 и рис. 7, содержание кремния в чугуне также качественно связано с L_s и $C/C_{\text{нас}}$. Таким образом, можно высказать предположение о том, что при недостатке тепла значения $C/C_{\text{нас}}$, L_s и $[Si]$ снижаются. Аналогичные исследования на технологических данных за другие месяцы работы ДП №9 ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог» подтвердили эту закономерность, а также качественный характер парных связей между $C/C_{\text{нас}}$, L_s и $[Si]$.

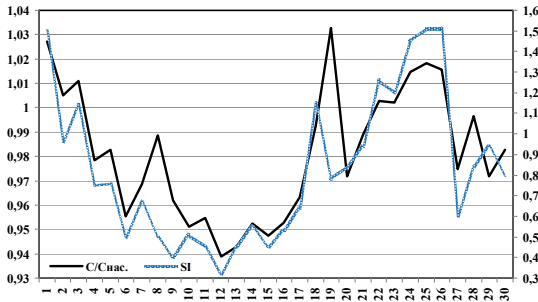


Рис.7. Динамика изменения технологических параметров $C/C_{\text{нас}}$ и содержания кремния в чугуне для ДП №9 ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог», массив 3.

Анализ технологических данных плавок чугуна за 3 месяца показал, что оптимальным диапазоном $C/C_{\text{нас}}$ с точки зрения эффективного обессеривания чугуна для доменной печи №9 ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог» является диапазон 0,97–1,00. Так как достижение таких высоких значений $C/C_{\text{нас}}$ может привести к дополнительным затратам, связанным, например с увеличением расхода кокса, принятие управляющего воздействия рекомендуется осуществлять в диапазоне $C/C_{\text{нас}}$ 0,94–0,97, а в подсистеме контроля «Горн» целесообразно выдавать предупреждающую рекомендацию о необходимости мониторинга уровня теплового состояния горна. Исследованные массивы данных (рис. 1-6) свидетельствуют о том, что вовремя принятое управляющее воздействие будет также способствовать интенсивному обессериванию чугуна.

Выводы.

1. С момента снижения $C/C_{\text{нас}}$ ниже значения 0,97 необходимо 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.

2. В результате исследований 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

інтенсивного обессеривання чугуна.

3. В случае отсутствия оперативного контроля содержания углерода в чугуне для наиболее полной оценки влияния величины критерия $C/C_{\text{нас}}$ на состояние углеродистой футеровки горна целесообразен регулярный мониторинг критерия $C/C_{\text{нас}}$ за счёт дополнительной информации из конвертерного цеха о содержании углерода в чугуне конкретной доменной печи.

1. *Миттад И.* Прогресс в области огнеупорной футеровки горнов доменных печей. // Сталь. –2005. –№11. –С.20–22.

2. *В.М. Суровский, Н.К. Некрасов.* Кинетика растворения углерода в чугуне. // Чёрная металлургия. Известия ВУЗов. – 1971. – №1.–С.164.

3. *Растворение* углеродистого кирпича под действием жидкого чугуна. / Х.В.Гуденау, Ж.П.Мюланца, М.Шайве и др. // Черные металлы. –1991. –№2. – С.25–31.

4. *Суровский В.И., Некрасов Н.К.* Влияние углерода на массоперенос его при растворении в расплавах железа. // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия. –1973. – №7. –С.5–7.

5. *Камкина Л.В.* Разработка физико-химических и математических моделей окислительно-восстановительных процессов чёрной металлургии на основе неравновесной термодинамики: Дис. д.-ра техн. Наук. – Днепропетровск, 1996. – 407с.

6. *К вопросу* о насыщении чугуна углеродом при работе доменных печей с вдуванием в горн природного газа. / С.Л.Ярошевский, Н.Н.Попов, З.Ш.Плоткин и др. // Сб. трудов ДонНИИчермет. – Вып.8. – М.: Металлургия, – 328 с.

7. *Мороз В.Ф., Тогобицкая Д.Н., Ходотова Н.Е.* О взаимодействии чугуна с углеродистыми материалами. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб.наук.тр.ИЧМ. – Вып. 14. – 2007. – С.95–101.

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

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

Вплив спільного насичення вуглецем і знесірчення чавуну на його якість

Досліджено взаємозв'язок процесів спільного насичення вуглецем і знесірчення чавуну на прикладі промислових даних ДП № 9 ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг». Запропоновано межі критерію $C / C_{\text{нас}}$, що створюють оптимальні умови для збереження вуглецевої футеровки доменної печі і забезпечують знесірчення чавуну. Показано, що при зниженні $C/C_{\text{нас}}$ менш ніж 0,97 необхідно відстежувати рівень теплого стану горна доменної печі з метою поліпшення умов насичення вуглецем чавуну і збереження вуглецевої футеровки. Прийняття керуючого впливу пропонується здійснювати у діапазоні $C/C_{\text{нас}}$ 0,94-0,97.