

**Н.М.Можаренко, А.А.Параносенков, Г.В.Панчоха  
Г.И.Орел, П.И.Отгорвин, В.С.Листопадов, К.А.Дмитренко**

## **ВЗАИМОСВЯЗЬ СТЕПЕНИ НАСЫЩЕНИЯ ЧУГУНА УГЛЕРОДОМ И РАЗГАРА ФУТЕРОВКИ МЕТАЛЛОПРИЕМНИКА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

*Институт черной металлургии НАН Украины  
ОАО "Миттал Стіл Кривий Ріг"*

Выявлена взаимосвязь степени насыщения чугуна углеродом и разгара футеровки металлоприемника доменной печи. Выработано технологическое требование к чугуну по содержанию в нем углерода для увеличения стойкости и долговечности металлоприемника.

### **Современное состояние вопроса.**

Основной причиной остановки на капитальный ремонт I-го разряда большинства доменных печей мира является чрезмерное разрушение футеровки металлоприемника, что естественно уменьшает кампанию печи. К тому же большие капитальные затраты при ремонте горна и лещади доменной печи приводят к увеличению удельных затрат на тонну выплавляемого чугуна, что способствует удорожанию конечной продукции металлургического предприятия. Учитывая это, актуальным вопросом повышения экономичности доменной плавки является увеличение длительности эксплуатации металлоприемника, условия работы которого характеризуются значительной агрессивностью ввиду высоких температур и присутствия жидких продуктов плавки к футеровке печи.

Одним из основных видов износа углеродистых огнеупоров металлоприемника является эрозия футеровки под действием жидкого чугуна, самой малоисследованной стороной которой является растворения углеродистых блоков в чугуне. Растворение футеровки чугуном в основном возникает из-за процессов, сопровождающих отработку жидких продуктов плавки. Во время выпуска чугуна и шлака из доменной печи в металлоприемнике получают развитие гидродинамические процессы, ориентированные на работающую летку. В конце выпуска при опускании осевой зоны малоподвижных материалов у стен горн на границе с лещадью формируется кольцевой поток чугуна вдоль стен с максимальной скоростью 2–3 см/с, который существует длительное время и приводит к эрозии футеровки с образованием «грибовидного» профиля в этом месте [1]. При этом скорость эрозии огнеупоров, при условии отсутствия гарнисажа, приблизительно равна 5 см в месяц.

### **Цель работы.**

На различных доменных печах скорость износа углеродистой футеровки будет зависеть от шихтовых и технологических условий работы конкретной доменной печи, особенностей ее конструкции (зумпф, качест-

во и способ укладки огнеупоров). При этом представляет интерес изучение процесса растворения углеродистой футеровки в чугуна мощных доменных печей, что также сказывается негативно на продолжительности их кампании.

С этой целью были проведены исследования взаимосвязи степени насыщенности чугуна углеродом и разгара футеровки металлоприемника доменной печи №9 ОАО «Криворожсталь», полезным объемом 5000 м<sup>3</sup>. Главной задачей работы была определена выработка технологического требования к чугуну по содержанию в нем углерода, обеспечивающего «щадящий» режим работы металлоприемника по отношению к высокотемпературному чугуну.

#### **Изложение основных материалов исследования.**

Химическое растворение углерода кладки чугуном возможно при существовании разницы между концентрацией насыщения чугуна углеродом и фактического его содержания в расплаве. Причем эта разность равновесной и фактической концентраций может широко изменяться в различных зонах металлоприемника и в целом во времени при колебаниях температуры чугуна в доменной печи, которая зависит от теплового состояния горна. Равновесное содержание углерода в чугуна можно определить по уточненной нами формуле Куликова [2]:

$$C_p = 1,34 + 2,51 \cdot 10^{-3} \cdot t_c - 0,34 \cdot Si - 0,33 \cdot P - 0,38 \cdot S + 0,022 \cdot Mn \quad [3], \quad (1)$$

где  $t_c$  – температура чугуна, °C,

Si – содержание кремния в чугуна, %;

P – содержание фосфора в чугуна, %;

S – содержание серы в чугуна, %;

Mn – содержание марганца в чугуна, %.

С целью определения влияния температуры чугуна и его компонентов на равновесную концентрацию углерода была проведена расчетно-аналитическая оценка с использованием зависимости (1) по данным химического состава чугунов ДП №9 за май 2005 г. Наибольшая факторная нагрузка на значение концентрации насыщения чугуна углеродом принадлежит температуре расплава и содержанию в нем кремния. Причем влияние вышеназванных факторов прямо противоположно, рис.1, 2.

Не смотря на присутствие в зависимости (1) массового содержания фосфора, серы и марганца, коэффициент корреляции концентрации насыщения чугуна углеродом с ними составил: Mn – 0,04, S – 0,012, P – 0,01, что свидетельствует о незначительном влиянии данных элементов для выбранных условий плавки. Высокие значения коэффициента корреляции концентрации насыщения чугуна углеродом с массовым содержанием кремния (–0,88) и температуры (0,67) чугуна показывают определяющую их роль в значении равновесной концентрации углерода. Таким образом, расчетный эксперимент показал, что преобладающее влияние на концентрацию насыщения чугуна углеродом таких факторов как содержание в расплаве кремния и температуры создает предпосылки к чувствительно-

сти фактического содержания углерода в чугуна на температурно-тепловое состояние горна доменной печи.

Из рис. 1 и 2 видно, что равновесная концентрация углерода в чугуна существенно превышает его фактическое содержание на выпуске, которое на доменной печи №9 составляло в среднем в мае 2005 г. – 4,37%. На рис.3 представлены графики равновесного и фактического содержания углерода в чугуна за тот же период времени.

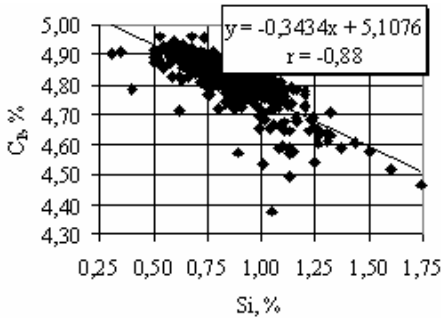


Рис. 1. Влияние содержания кремния в чугуна на равновесную концентрацию в нем углерода по данным работы ДП №9 за май 2005 г.

Как следует из рис. 3, значительный разрыв уровней концентрации насыщения чугуна углеродом и фактического содержания его в расплаве приводит к углеродному дефициту в чугуна. Отдельные факторы, такие как понижение равновесного содержания углерода или периодическое приближение уровней фактического и равновесного содержания углерода в чугуна не изменяют общую тенденцию. Для исследованного диапазона разница равновесного и фактического содержания составляла 0,44 %. В связи с этим возникла необходимость выявления эффективных обобщающих критериев степени агрессивности чугуна по отношению к углеродистой футеровке металлоприемника и разработки технологического требования к чугуна по содержанию в нем углерода для повышения стойкости огнеупоров, что будет способствовать увеличению продолжительности кампании доменной печи.

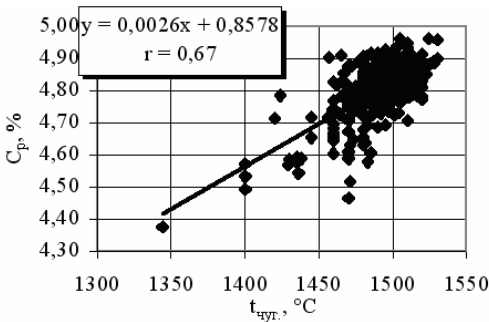


Рис. 2. Влияние температуры чугуна на равновесную концентрацию углерода в чугуна по данным работы ДП №9 за май 2005 г.

Обобщающим критерием концентрации углерода была выбрана степень насыщения чугуна углеродом, рассчитываемая по формуле [4], %:

$$\eta_C = (C / C_p) 100 \quad (4)$$

где  $C$  – фактическое содержание углерода в чугунае, %;  
 $C_p$  – равновесное содержание углерода в чугунае, %.

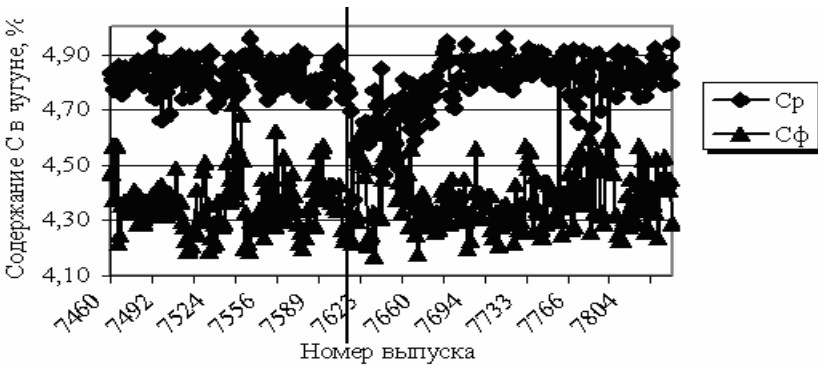


Рис. 3. Равновесное ( $C_p$ ) и фактическое ( $C_f$ ) содержание углерода в чугунае по данным за май 2005 г. Вертикальной линией обозначена семидневная стоянка печи

При разработке технологического требования к чугунае по содержанию в нем углерода необходимо ориентироваться на динамику изменения остаточной толщины футеровки металлоприемника доменной печи. А так как остаточная толщина футеровки может быть рассчитана по величине тепловых нагрузок на холодильники системы охлаждения металлоприемника и температур кладки, то необходимо выявить функциональные зависимости толщины футеровки от названных факторов. Для данной задачи предпочтительнее установление зависимостей толщины футеровки 4 и 5 пояса термопар металлоприемника, так как они расположены напротив наиболее уязвимой зоны металлоприемника – стыка горна и лещади, рис. 4.

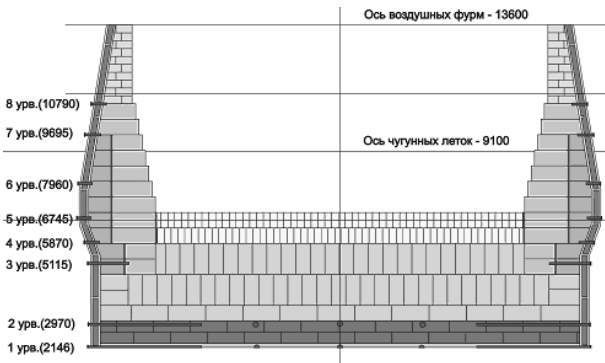


Рис. 4. Расположение поясов термопар металлоприемника доменной печи №9

Функциональная зависимость толщины кладки 4 пояса от тепловой нагрузки удовлетворительно описывается степенной функцией и имеет вид, рис. 5:

$$f(Q) = 31951 \cdot Q^{-1,0994}, R^2 = 0,9997, \quad (2)$$

где  $Q$  – тепловая нагрузка на холодильники, ккал/час;

$R^2$  – достоверность аппроксимации тренда.

Функциональная зависимость толщины кладки 4 пояса от ее температуры также удовлетворительно описывается степенной функцией и имеет вид, рис. 5.6:

$$f(t) = 1559,8 \cdot t^{-1,1648}, R^2 = 0,9999 \quad (3)$$

где  $t$  – температура кладки, °С.

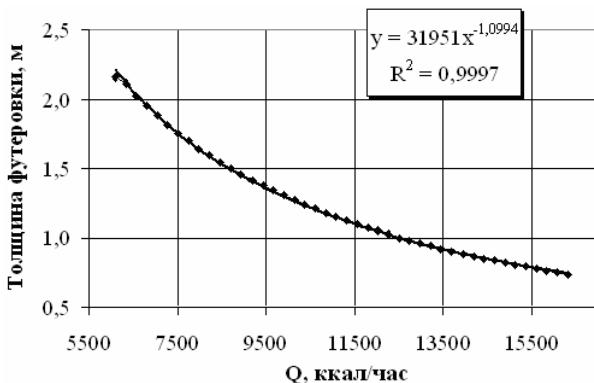


Рис. 5. Зависимость толщины футеровки металлоприемника 4 пояса от тепловой нагрузки на холодильники

Для выведения функциональной зависимости толщины футеровки от степени насыщенности чугуна

углеродом использовали данные работы ДП№9 за март 2005 г., усредненные по суткам, когда четко проявилась связь между данным показателем и интенсивностью тепловых потоков на холодильники металлоприемника, рис. 7, 8.

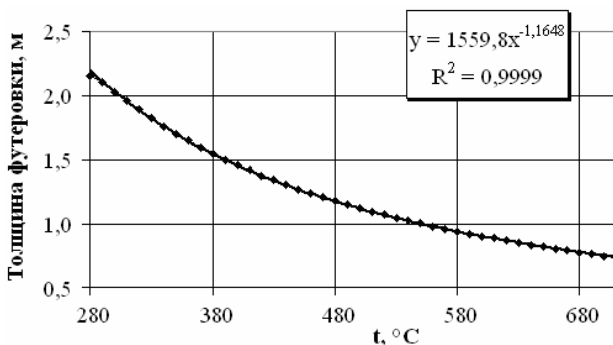


Рис. 6. Зависимость толщины футеровки металлоприемника 4 пояса от температуры кладки

Как видно из рис. 7, 8, в начале месяца динамика изменения тепловых нагрузок на холодильники верхней лещадки и степень насыщения чугуна углеродом соответствуют друг другу. В дальнейшем

связь была несколько «зашумлена», однако общая тенденция сохраняется на протяжении всего месяца.

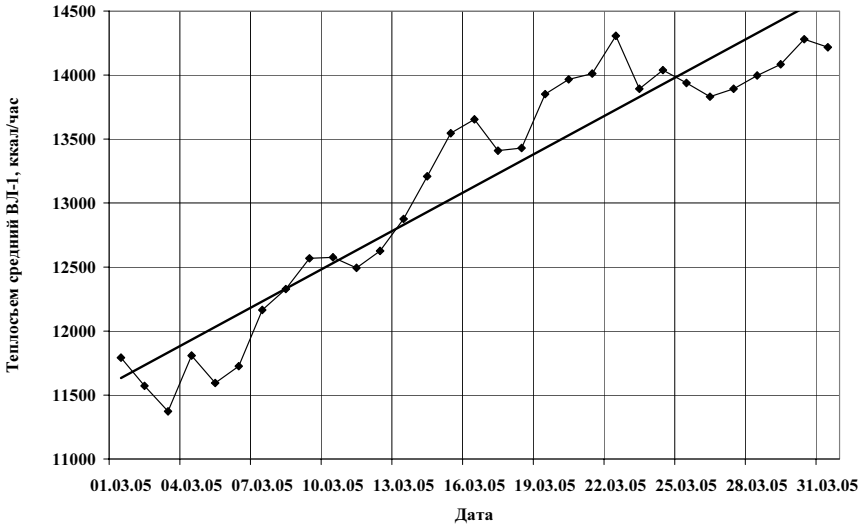


Рис. 7. Динамика изменения тепловых нагрузок на холодильники лещади в марте 2005 г.

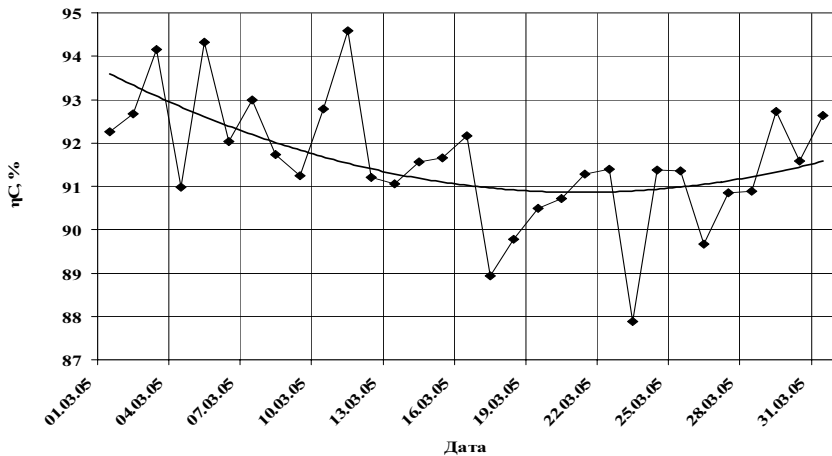


Рис. 8. Динамика изменения степени насыщения чугуна углеродом в марте 2005 г.

Это позволило при помощи регрессионного анализа на основании вышеприведенных данных установить функциональную зависимость теп-

ловой нагрузки на холодильники верхней лещадки от степени насыщения чугуна углеродом:

$$f(\eta_C) = 43843 - 335,368 \cdot \eta_C, r = 0,51. \quad (5)$$

Используя приведенные функциональные зависимости, был определен требуемый уровень степени насыщения чугуна углеродом – 94 %. Высокая агрессивность чугуна возникает при  $\eta_C$  менее 0,90 %.

Таким образом, для повышения стойкости футеровки металлоприемника доменной печи необходимо поддерживать степень насыщения чугуна углеродом на уровне не ниже 94 %. В абсолютном значении фактическое содержание углерода в чугуне при степени насыщения равном 94 % составляет 4,45–4,50 %, рис. 9.

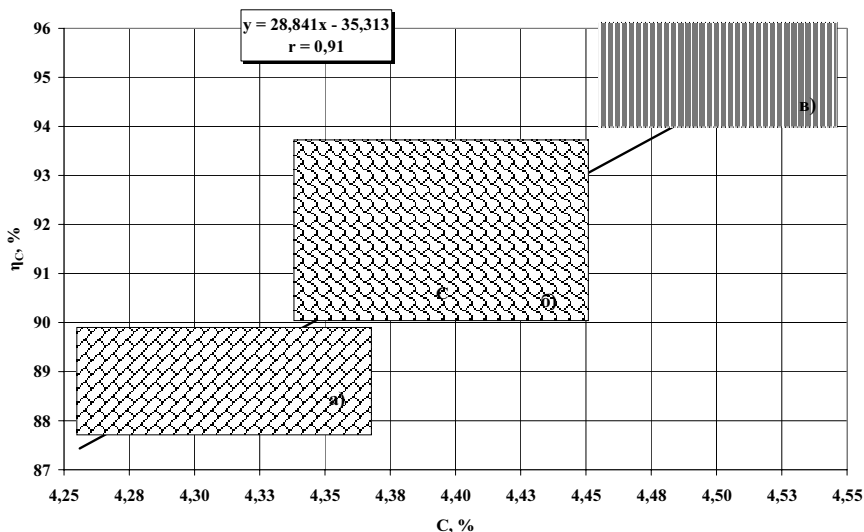


Рис. 9. Диапазоны различной степени агрессивности чугунов по отношению к углеродистой футеровке металлоприемника по среднесуточным данным за январь 2005 г.: а) высокая агрессивность; б) агрессивный чугун; в) не агрессивный чугун

### Выводы.

1. Одним из механизмов износа углеродистой футеровки металлоприемника доменной печи является растворение ее углерода в чугуне.
2. Практически постоянно у чугуна доменной печи №9 существует дефицит углерода, составляющего 0,39–0,44 %, что создает предпосылки к растворению углеродистой футеровки металлоприемника чугуном.
3. Для повышения стойкости футеровки металлоприемника необходимо поддержание степени насыщения чугуна углеродом не ниже 94 %, а уровень содержания углерода в чугуне должен быть не ниже 4,45–4,50 %.

4. Для дальнейшего изучения проблемы растворения углерода футеровки металлоприемника доменной печи в чугуна необходимо разработать теоретическое описание данного явления.

1. *Математическое* моделирование эрозии футеровки доменной печи, происходящей в результате растворения углерода // *Рев. Мет.* 1993, 90, №7–8, с. 955–963.
2. *Куликов И.С.* Десульфурация чугуна. – М: Металлургиздат, 1962. – 306с.
3. *К вопросу* определения насыщения углеродом перелитечного чугуна доменной плавки. / Н.М.Можаренко, А.А.Параносенков, Д.Н.Тогобицкая, Г.В.Панчоха // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб тр. ИЧМ.* – Вып. 8. – 2004. – С.121–129.
4. *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, 1980. – 328 с.

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