

УДК 621.385.6:669

© Сущенко А.В.¹, Попов Е.С.², Сидорчук Р.С.³, Гриценко А.С.⁴**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ОКИСЛЕННОСТЬ
КОНВЕРТЕРНОГО ШЛАКА**

Выполнена проверка адекватности известных выражений для определения содержания оксидов железа в конвертерном шлаке после продувки плавки. Проведен статистический анализ и получены зависимости для прогноза окисленности шлака применительно к условиям работы 350-т конвертеров ПАО «МК «Азовсталь».

Ключевые слова: конвертерная плавка, параметры шлака, содержание оксидов железа, технологические параметры, статистический анализ, регрессия.

Сущенко А.В., Попов Е.С., Сидорчук Р.С., Гриценко О.С. Вплив технологічних факторів на окисненість конвертерного шлаку. Виконана перевірка адекватності відомих виразів для визначення вмісту оксидів заліза у конвертерному шлаку після продування плавки. Проведений статичний аналіз та отримані залежності для прогнозування кисненості шлаку стосовно до умов роботи 350-т конвертерів ПАТ «МК «Азовсталь».

Ключові слова: конвертерна плавка, параметри шлаку, вміст оксидів заліза, технологічні параметри, статистичний аналіз, регресія.

A.V. Sushchenko, E.S. Popov, R.S. Sidorchuk, A.S. Gritsenko. Influence technological factors on converter slag oxidization. Examination of adequacy of known expressions for determination of iron oxide consistence in BOF slag after purging was completed. Statistic analysis was performed and dependences to forecast slag oxidization for the 350-t converters of PAS "MK "Azovsteel" operating conditions were obtained.

Keywords: converter melting, slag parameters, iron oxides consistence, technological parameters, statistical analysis, regression.

Постановка проблемы. Содержание оксидов железа в шлаке ($\Sigma Fe_x O_y$) определяет его окислительную способность, консистенцию и процесс шлакообразования в целом. От динамики изменения параметра $\Sigma Fe_x O_y$ по ходу, а также его величины в конце продувки плавки, существенным образом зависят такие технико-экономические показатели производства стали, как: удельный расход металлошихты, степени усвоения шлакообразующих материалов, стойкость футеровки конвертера, качество полученного металла и др. Регулирование содержания оксидов железа в шлаке по ходу продувки, поддержание его на оптимальном уровне, а также прогнозирование конечной окисленности шлака, являются важнейшими задачами совершенствования технологии конвертирования чугуна и развития автоматизированных систем управления технологическими процессами в конвертере.

Анализ последних исследований и публикаций. В технической литературе приводятся многочисленные данные экспериментальных (лабораторных и промышленных) исследований динамики изменения показателей окисленности шлака по ходу продувки плавки. Однако, они часто носят качественный характер, а имеющиеся количественные зависимости позволяют прогнозировать только конечное содержание оксидов железа в шлаке. При этом, как на практике, так и в учебном процессе широко используются следующие зависимости:

¹ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь; sushchenko.andrei@gmail.com

² директор по технологии и качеству ПАО «МК «Азовсталь», входящий в ООО «Метинвест холдинг», г. Мариуполь; evgeniy.popov@azovstal.com.ua

³ начальник технологического управления ПАО «МК «Азовсталь», входящий в ООО «Метинвест холдинг», г. Мариуполь sidorchuk-rs@azovstal.com.ua

⁴ специалист первой категории ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь; Gritcenko.a.s@mail.ru

- из [1, 2] при $[C]_{me} < 0.10$ %:

$$(FeO)_{шл} = \left(12 + \frac{0,9}{[C]_{me}} \right) \frac{2}{3}, \% \quad (1)$$

где $[C]_{me}$ - содержание углерода в металле после продувки, %;

- из [3]:

$$(FeO)_{шл} = 5,15 \frac{\sqrt[3]{B}}{\sqrt[4]{[C]_{me}}}, \% \quad (2)$$

где B – основность шлака после продувки;

- из [4] – в таблице 1:

Таблица 1

Зависимость содержания $(FeO)_{шл}$, от содержания углерода в металле после продувки

$[C]_{me}$, %	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
$(FeO)_{шл}$, %	19,00	16,95	15,50	14,50	13,85	13,75	13,65	13,58

- из [5, 6]:

$$(FeO)_{шл} = \left(1,25 + 4 \cdot B + \frac{0,3}{[C]_{me}} + 10^{-6} \cdot T_{me}^2 \right) \frac{2}{3}, \% \quad (3)$$

где T_{me} - температура металла после продувки, °C.

Для проверки адекватности указанных выше зависимостей были выполнены сравнения расчетных (по [1-6]) значений $(FeO)_{шл}$ с фактическими данными по массиву плавов, проведенных на 350-т конвертерах ПАО «МК «Азовсталь» с ноября 2012 г. по август 2013 г. При этом в обработке использовали показатели только тех плавов, на которых выполнялись отборы проб для определения химических составов жидкого чугуна, металла и шлака после продувки, а также были выполнены замеры температур чугуна и металла. Были исключены плавки с возвратом металла в конвертер, промежуточным скачиванием шлака и проведенные на рельсовую сталь (с науглероживанием металла жидким чугуном в ковше). В итоге количество плавов, участвующее в обработке составило 2513. Результаты сравнения расчетных значений $(FeO)_{шл}$ по приведенным выше выражениям с промышленными данными приведены на рис. 1. Как видно, все указанные выше известные расчетные зависимости являются не пригодными для прогноза окисленности шлака после продувки плавов в реальных условиях работы 350-т конвертеров МК «Азовсталь».

Цель данной работы – изучить влияние производственно-технологических факторов на величину окисленности шлака после продувки плавки, и получить адекватные зависимости для ее определения в условиях конвертерного цеха МК «Азовсталь».

Изложение основного материала. Окисленность конвертерного шлака выражают различными способами: через суммарное содержание в нем железа ($\Sigma(Fe)$ или $Fe_{общ}$), концентрацию закиси железа (FeO), суммарную концентрацию оксидов железа ($FeO + Fe_2O_3$), или приведенную суммарную их концентрацию, пересчитанную через эквивалентное количество FeO . В ККЦ МК «Азовсталь» в качестве показателя окисленности шлака используется содержание в нем FeO . Величина $Fe_{общ}$ в конвертерных шлаках определяется в экспресс-лаборатории на рентгеновском спектрометре ARL 9900 в соответствии с требованиями ДСТУ 3564-97. Для пересчета на содержание $(FeO)_{шл}$ используется эмпирическая зависимость, полученная путем статистической обработки результатов анализа проб шлака, выполненных химическими методами. Учитывая, что указанная зависимость периодически корректируется (в связи с изменением соотношения долей FeO и Fe_2O_3 в шлаках), для минимизации погрешности определения показателя окисленности шлака в качестве последнего была выбрана величина $Fe_{общ}$.

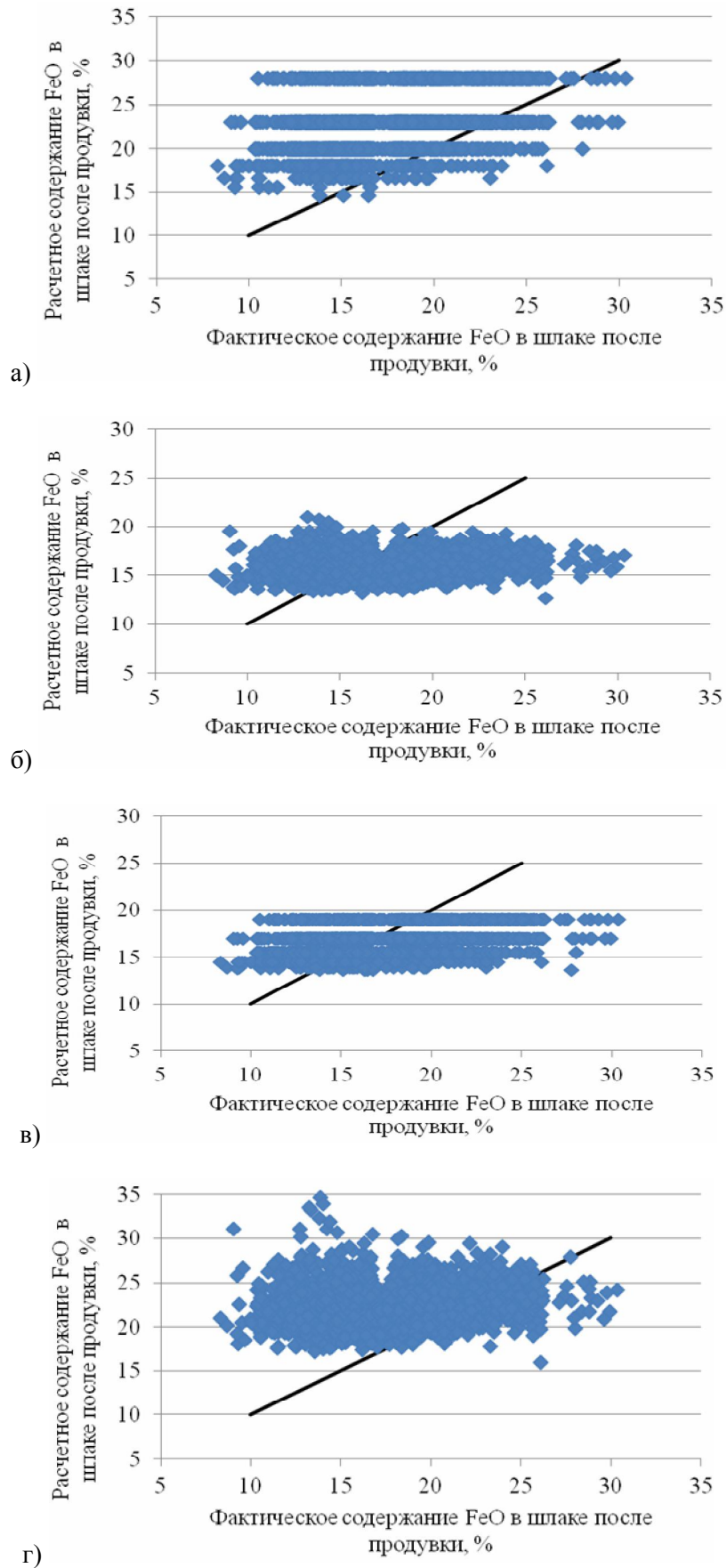


Рис. 1 – Сравнение результатов расчета FeO в шлаке после продувки по методикам: а) - [1, 2]; б) - [3]; в) - [4]; г) - [5, 6] с данными промышленных плавов

Для определения влияния технологических параметров на величину $Fe_{общ}$ был проведен статистический анализ (парная и множественная регрессии) показателей плавки по указанному выше массиву. Уравнения парной регрессии, имеющие коэффициент корреляции $R > 0.32$, приведены в таблице 2. При этом не значимыми оказались такие аргументы: T_{me} , $[S]_{me}$, $[P]_{me}$, $T_{чуг}$, $[Mn]_{чуг}$, $[S]_{чуг}$, $[P]_{чуг}$, $M_{чуг} \cdot [Mn]_{чуг} \cdot 10^{-2}$, $M_{чуг} \cdot [S]_{чуг} \cdot 10^{-2}$, $M_{чуг} \cdot [P]_{чуг} \cdot 10^{-2}$, $M_{чуг} [Mn]_{чуг} \cdot 10^3 / G_0$, $M_{чуг} \cdot [S]_{чуг} \cdot 10^3 / G_0$, $M_{чуг} \cdot [P]_{чуг} \cdot 10^3 / G_0$, B , BB , $(MgO)_{шл}$, $M_{изв} \cdot 10^3 / G_0$, $M_{угля} \cdot 10^3 / G_0$, $M_{БР} \cdot 10^3 / G_0$, $V_{O_2}^{\Sigma}$, $\tau_{прод}$, $10^3 \cdot M_{чуг} / M_{me}$.

Таблица 2

Парные корреляционные зависимости величины $Fe_{общ}$ от некоторых технологических факторов

№ п/п	Фактор	Ед. изм.	R	Уравнение регрессии
1	$[Si]_{чуг}$	%	0.33	$y = 13.499x^2 - 30.163x + 34.706$
2	$M_{чуг} \cdot [Si]_{чуг} \cdot 10^{-2}$	т	0.39	$y = 1.4626x^2 - 10.406x + 34.994$
3	$M_{чуг} \cdot T_{чуг}$	т*°C	0.40	$y = -4 \cdot 10^{-10} x^2 + 0.0001x + 21.777$
4	$M_{чуг} \cdot [Si]_{чуг} \cdot 10^3 / G_0$	кг Si/ т МШ	0.40	$y = 0.1973x^2 - 3.8659x + 35.057$
5	$M_{чуг} \cdot T_{чуг} / G_0$	т*°C/ т МШ	0.46	$y = 7 \cdot 10^{-5} x^2 - 0.1969x + 145.14$
6	$[C]_{me}$	%	0.36	$y = 1637.3x^2 - 300.03x + 30.686$
7	$[Mn]_{me}$	%	0.49	$y = 1135.5x^2 - 280.64x + 34.14$
8	$10^3 \cdot M_{чуг} / G_0$	кг/т МШ	0.40	$y = 0.0002x^2 - 0.4397x + 212.79$
9	$(M_{чуг}^{прив})^I$	кг/т МШ	0.46	$y = 0.0001x^2 - 0.2715x + 151.14$
10	$(M_{чуг}^{прив})^{II}$	кг/т МШ	0.53	$y = 0.0003x^2 - 0.4631x + 220.89$
11	$(M_{чуг}^{прив})^{III}$	кг/т МШ	0.54	$y = 0.0003x^2 - 0.4933x + 232.52$
12	$(M_{чуг}^{прив})^{IV}$	кг/т МШ	0.53	$y = 0.0004x^2 - 0.6229x + 284.87$
13	$(M_{чуг}^{прив})^V$	кг/т МШ	0.50	$y = 0.0001x^2 - 0.2756x + 149.19$
14	$(M_{чуг}^{прив})^{VI}$	кг/т МШ	0.49	$y = 0.0002x^2 - 0.3321x + 173.13$

При этом были приняты следующие обозначения: $[Si]_{чуг}$, $[Mn]_{чуг}$, $[S]_{чуг}$, $[P]_{me}$ – содержание в чугуне кремния, марганца, серы и фосфора соответственно, %; $T_{чуг}$ – температура чугуна, °C; $M_{чуг}$ – расход чугуна, т; $[C]_{me}$, $[Mn]_{me}$, $[S]_{me}$, $[P]_{me}$ – содержание в металле после продувки углерода, марганца, серы и фосфора соответственно, %; T_{me} – температура металла после продувки, °C; $B = \frac{CaO}{SiO_2}$ и $BB = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + P_2O_5}$ – основности шлака после продувки соответственно; $(MgO)_{шл}$ – содержание MgO в шлаке, %; $M_{изв}$, $M_{угля}$, $M_{БР}$ – суммарные расходы извести угля и брикетов раскисляющих на плавку, т; G_0 – масса металлошихты (садка), т; $V_{O_2}^{\Sigma}$ – суммарный расход технического кислорода на плавку, тыс. м³; $\tau_{прод}$ – продолжительность продувки, мин; M_{me} – масса жидкого металла после продувки, т; $M_{чуг}^{прив}$ – приведенный удельный расход жидкого чугуна на плавку, соответственно равный (варианты), кг/т МШ:

$$(M_{\text{чуг.жс}}^{\text{прив}})^I = \frac{M_{\text{чуг.жс}} \cdot (61.9 + 0.88 \cdot T_{\text{чуг.жс}})}{G_0 \cdot (61.9 + 0.88 \cdot 1300)} \cdot 1000 \quad (4)$$

$$(M_{\text{чуг.жс}}^{\text{прив}})^{II} = \frac{M_{\text{чуг.жс}} \cdot \left((61.9 + 0.88 \cdot T_{\text{чуг.жс}}) + 26970 \cdot \frac{[Si]_{\text{чуг.жс}}}{100} \right)}{G_0 \cdot \left((61.9 + 0.88 \cdot 1300) + 26970 \cdot \frac{0.7}{100} \right)} \cdot 1000 \quad (5)$$

$$(M_{\text{чуг.жс}}^{\text{прив}})^{III} = \frac{M_{\text{чуг.жс}} \cdot \left((61.9 + 0.88 \cdot T_{\text{чуг.жс}}) + 26970 \cdot \frac{[Si]_{\text{чуг.жс}}}{100} + 7000 \cdot \frac{[Mn]_{\text{чуг.жс}}}{100} \right)}{G_0 \cdot \left((61.9 + 0.88 \cdot 1300) + 26970 \cdot \frac{0.7}{100} + 7000 \cdot \frac{0.2}{100} \right)} \cdot 1000 \quad (6)$$

$$(M_{\text{чуг.жс}}^{\text{прив}})^{IV} = \frac{M_{\text{чуг.жс}} \cdot \left((61.9 + 0.88 \cdot T_{\text{чуг.жс}}) + 26970 \cdot \frac{[Si]_{\text{чуг.жс}}}{100} + 7000 \cdot \frac{[Mn]_{\text{чуг.жс}}}{100} + 147.753 \cdot 4.25 \right)}{G_0 \cdot \left((61.9 + 0.88 \cdot 1300) + 26970 \cdot \frac{0.7}{100} + 7000 \cdot \frac{0.2}{100} + 147.753 \cdot 4.25 \right)} \cdot 1000 \quad (7)$$

$$(M_{\text{чуг.жс}}^{\text{прив}})^V = \frac{(M_{\text{чуг.жс}} + M_{\text{чуг.жс}}^{\text{мс}}) \cdot \left(26970 \cdot \frac{[Si]_{\text{чуг.жс}}}{100} + 7000 \cdot \frac{[Mn]_{\text{чуг.жс}}}{100} \right) + (61.9 + 0.88 \cdot T_{\text{чуг.жс}}) \cdot M_{\text{чуг.жс}}}{G_0 \cdot \left((61.9 + 0.88 \cdot 1300) + 26970 \cdot \frac{0.7}{100} + 7000 \cdot \frac{0.2}{100} \right)} \cdot 1000 \quad (8)$$

$$(M_{\text{чуг.жс}}^{\text{прив}})^{VI} = \frac{(M_{\text{чуг.жс}} + M_{\text{чуг.жс}}^{\text{мс}}) \cdot \left(26970 \cdot \frac{[Si]_{\text{чуг.жс}}}{100} + 7000 \cdot \frac{[Mn]_{\text{чуг.жс}}}{100} + 147.753 \cdot 4.25 \right) + (61.9 + 0.88 \cdot T_{\text{чуг.жс}}) \cdot M_{\text{чуг.жс}}}{G_0 \cdot \left((61.9 + 0.88 \cdot 1300) + 26970 \cdot \frac{0.7}{100} + 7000 \cdot \frac{0.2}{100} + 147.753 \cdot 4.25 \right)} \cdot 1000 \quad (9)$$

где $(61.9 + 0.88 \cdot T_{\text{чуг.жс}})$ – физическая теплота (энтальпия) жидкого чугуна, кДж/кг; 14775,3, 26970 и 7000 – приведенные тепловые эффекты реакций окисления углерода, кремния и марганца соответственно, кДж/кг элемента; 4,25 – среднее содержание углерода в чугуне, %; $M_{\text{чуг.жс}}^{\text{мс}}$ – суммарная масса твердого чугуна, т; 1300, 0.7 и 0.2 – средние (за 2012 г.) значения температуры, содержания кремния и марганца в жидком чугуне.

Наибольшее влияние на величину $Fe_{\text{общ}}$ оказывает комплексный параметр - приведенный удельный расход жидкого чугуна, определяемый по выражению (6), учитывающий физический и химический тепловые потенциалы жидкого чугуна. Это указывает на то, что в подавляющем большинстве случаев содержание $Fe_{\text{общ}}$ определяется тепловым балансом процесса, особенно в условиях «передува» плавки (окисление железа «в шлак» и «в дым» компенсирует недостаток приходной части теплового баланса).

В отличие от известных литературных данных, влияние $[C]_{\text{ме}}$ и $T_{\text{ме}}$ на величину $Fe_{\text{общ}}$ выражено в гораздо меньшей степени, причем с увеличением $T_{\text{ме}}$ имеет место тенденция снижения $Fe_{\text{общ}}$. Это, очевидно, объясняется следующим. Момент окончания продувки плавки машинистом дистрибутора зачастую определяется «по факелу» горящих отходящих газов над горловиной конвертера и показаниям системы газового анализа (т. е. фактически по содержанию углерода в металле); при этом, более высокая температура на повалке имеет место при большем тепловом потенциале шихтовки плавки. Следует также отметить, что величина $[Mn]_{\text{ме}}$ сильнее влияет на $Fe_{\text{общ}}$, чем $[C]_{\text{ме}}$. Наблюдается устойчивая тенденция увеличения окисленности шлака с ростом $[S]_{\text{чуг.жс}}$ и $[S]_{\text{ме}}$. В качестве примера, на рисунках 2, 3 приведены графики зависимостей $Fe_{\text{общ}}$ от $[C]_{\text{ме}}$ и $M_{\text{чуг.жс}}^{\text{прив}}$, определенному по (6).

При проведении множественной регрессии, незначимые параметры (аргументы) автоматически исключались из рассмотрения и не отражались в итоговом уравнении. Максимальное значение коэффициента корреляции ($R=0.74$) получено при совокупности следующих исходных параметров с соответствующими коэффициентами их влияния (рис. 4):

$$Fe_{\text{общ}} = 56,5618 - 2,87086 \cdot [Si]_{\text{чуг}} + 42,86821 \cdot [S]_{\text{чуг}} + 118,0113 \cdot [P]_{\text{чуг}} - 40,0498 \cdot [C]_{\text{ме}} - 34,9923 \cdot [S]_{\text{ме}} - 75,2349 \cdot [P]_{\text{ме}} - 2,01533 \cdot (MgO)_{\text{шл}} + 28,62067 \cdot BB - 29,879 \cdot B - 0,03505 \cdot M_{\text{чуг.ж}}^{\text{прив}} \quad (10)$$

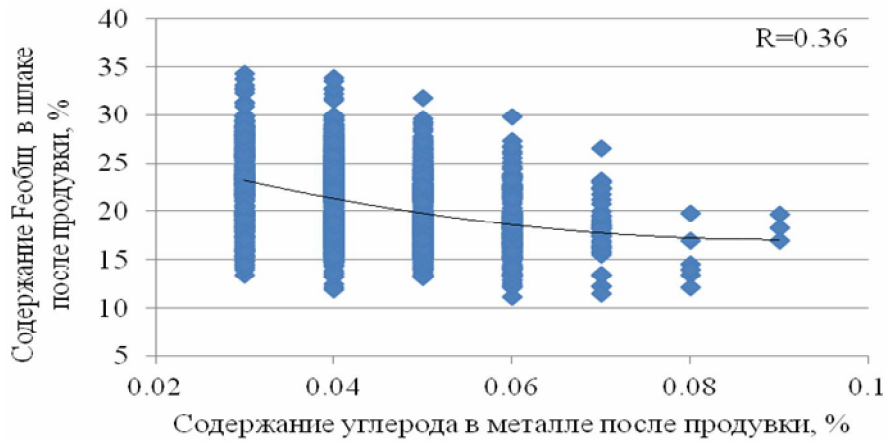


Рис. 2 – Влияние содержания углерода в металле после продувки на содержание $Fe_{\text{общ}}$ в шлаке

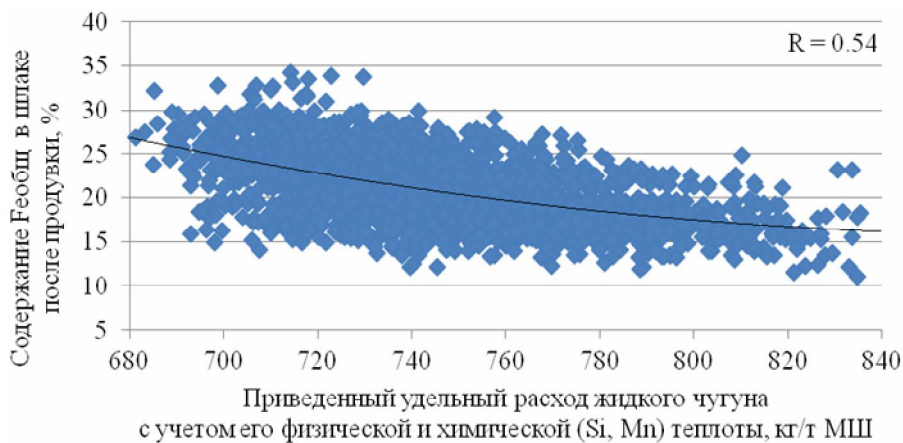


Рис. 3 – Зависимость $Fe_{\text{общ}}$ от приведенного удельного расхода жидкого чугуна, с учетом его физической теплоты и теплоты окисления, содержащихся в нем Si и Mn

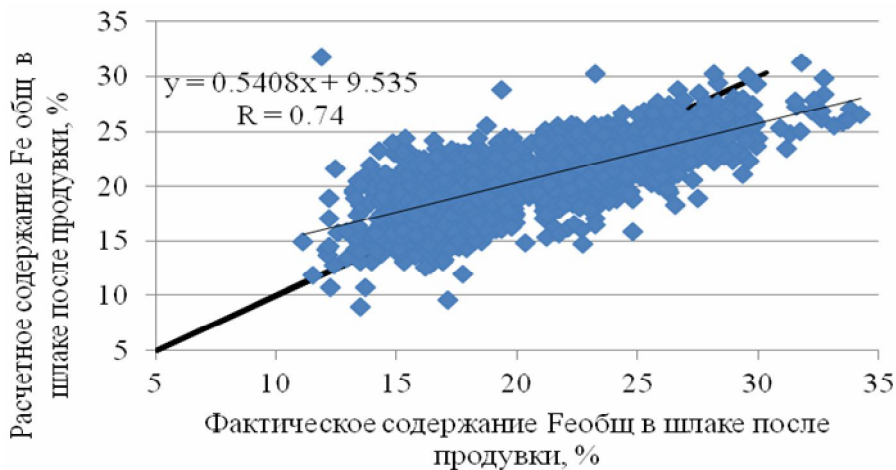


Рис. 4 – Сравнение результатов расчета $Fe_{\text{общ}}$ в шлаке после продувки по зависимости (10) с данными промышленных плавов

Уравнение (10) является не удобным для прогнозирования величины $Fe_{общ}$ по известным (до начала плавки) исходным данным. Обычно задаются: параметры жидкого чугуна, одно значение основности шлака (как правило ВВ) и $(MgO)_{шл}$, а также величина $[C]_{ме}$. Параметры $[Mn]_{ме}$, $[S]_{ме}$, $[P]_{ме}$ и В являются не известными. При этом, если они будут рассчитаны не точно, то, не смотря на высокие коэффициенты корреляции, это приведет к значительной погрешности при прогнозировании величины $Fe_{общ}$. После исключения из рассмотрения в (10) указанных неизвестных параметров получена следующая статистическая зависимость ($R=0.60$):

$$Fe_{общ} = 65,4973 + 45,7757 \cdot [S]_{чуг} + 46.8525 \cdot [P]_{чуг} - 97.4827 \cdot [C]_{ме} - 0,205 \cdot (MgO)_{шл} - 0,9589 \cdot ВВ - 0,0576 \cdot M_{чуг.ж}^{прив} \quad (11)$$

С целью увеличения точности прогнозирования величины $Fe_{общ}$ рассматриваемый массив плавок были разбит на части в соответствии с определенными диапазонами по $[C]_{ме}$ (0,02; 0,03; 0,04; 0,05; более 0,05 %). Однако это не привело к увеличению коэффициента корреляции.

Диапазоны изменения параметров, входящих в уравнение (11), а также показатели их влияния на изменение величины $Fe_{общ}$ приведены в таблице 3. Как видно, наибольшее влияние оказывает изменение теплового потенциала шихтовки плавки и степень ее «передуга». Зависимость от величины $[S]_{чуг}$ связана с характерным «холодным» ходом продувки плавки при повышенном содержании серы в металле. Влияние $[P]_{чуг}$ объясняется, очевидно, намерениями машинистов дистрибутора дополнительно «умягчить» продувку или «передуть» металл с целью уменьшения величины $[P]_{ме}$ при высоком содержание фосфора в исходном чугуне. Влияние основности ВВ связано с «разбавлением» концентрации оксидов железа в шлаке основными оксидами CaO и MgO (прямое влияние), а также с тем, что при более высоком тепловом потенциале шихтовки расход извести на плавку, как правило, увеличивают, при этом содержание $Fe_{общ}$ уменьшается, а содержание CaO возрастает (косвенное влияние). Зависимость от величины $(MgO)_{шл}$ связана с повышенной вязкостью шлака (особенно при больших значениях $(MgO)_{шл}$), что приводит к усилению угара металла «в дым» и «в шлак», а также к увеличению количества королек металла в нем.

Таблица 3

Влияние аргументов зависимости (11)
на изменение величины $Fe_{общ}$ в шлаке после продувки

Параметр	Диапазон изменения аргумента	Знак влияния	Максимальная амплитуда колебания $Fe_{общ}$
$M_{чуг.ж}^{прив}$	685 – 854	-	9,73
$[C]_{ме}$	0,03 – 0,09	-	5,85
$[S]_{чуг}$	0,006 – 0,08	+	3,39
Основность ВВ	1,7 – 4,9	-	3,07
$(MgO)_{шл}$	2,35 – 14,25	+	2,44
$[P]_{чуг}$	0,046 – 0,08	+	1,59

Результаты сравнения расчетных значений $Fe_{общ}$ в шлаке после продувки по зависимости (11) с промышленными данными приведены на рис. 5. Отклонение расчетных значений от фактических связано как с точностью определения исходных параметров (масса, хим. состав, температура чугуна, хим. составы шлака и металла после продувки и др.), так и со следующими не учтенными объективными и субъективными факторами: качество металлоохлаждителей (различные виды лома, скрапа зашлакованного и т.д.), колебания хим. состава (в т.ч. величины ППП) в шлакообразующих и других сыпучих материалах, ход продувки плавки (режимы дутья, присадки сыпучих материалов и т.п.).



Рис. 5 – Сравнение результатов расчета $Fe_{общ}$ в шлаке после продувки по зависимости (11) с фактическими данными плавки

Выводы

1. Показано, что известные и широко используемые в настоящее время, как на практике, так и в учебном процессе, зависимости для определения содержания оксидов железа в шлаке после продувки являются не пригодными для условий работы 350-т конвертеров МК «Азов-сталь».
2. На основании проведенного статистического двухфакторного анализа получено, что наибольшее влияние на величину $Fe_{общ}$ оказывает приведенный удельный расход жидкого чугуна (6), учитывающий его физический и химический тепловые потенциалы.
3. При проведении многофакторного регрессионного анализа получены уравнение (10) для прогнозирования окисленности конечного конвертерного шлака с коэффициентом корреляции $R = 0,74$, а также более удобная для практического использования зависимость (11), включающая только известные (до начала плавки) аргументы ($R = 0.60$).
4. Рассмотрены механизмы влияния значимых параметров ($M_{чуг.ж}^{прив}$, $[C]_{ме}$, $[S]_{чуг}$, основность шлака $ВВ$, $(MgO)_{шл}$, $[P]_{чуг}$) на содержание оксидов железа в шлаке после продувки.
5. Задачей дальнейших исследований является получение адекватных зависимостей, учитывающих дополнительное влияние на величину $Fe_{общ}$ видов и химических составов металлоохлаждателей, шлакообразующих и других сыпучих материалов, а также режимов продувки плавки и присадки сыпучих материалов.

Список использованных источников:

1. Бигеев А.М. Математическое описание и расчеты сталеплавильных процессов / А.М. Бигеев. – М.: Металлургия, 1982. – 160 с.
2. Бигеев А.М., Металлургия стали. Теория и технология плавки стали / А.М. Бигеев, В.А. Бигеев. – Магнитогорск: МГТУ, 2000. – 544 с.
3. Бойченко Б.М. Методичні вказівки до виконання розрахунків киснево-конвертерної плавки / Б.М. Бойченко, С.В. Бочка. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2001. – 25 с.
4. Димніч А.Х. Методичні вказівки до курсової роботи «Матеріальний і тепловий баланс конвертерної плавки» / А.Х. Димніч [та ін.]. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – 44 с.
5. Харлашин П.С. Методические указания к выполнению курсовой работы «Расчет материального и теплового балансов кислородно-конвертерной плавки при переделе обыкновенных чугунов» / П.С. Харлашин, В.Я. Бакст. – Мариуполь: ПГТУ, 2005. – 20 с.
6. Бигеев А.М. Основы математического описания и расчеты кислородно-конвертерных процессов производства стали / А.М. Бигеев, Ю.А. Колесников. – М.: Металлургия, 1970. – 232 с.

Bibliography:

1. Bigeev A.M. Mathematic description and calculations of steelmaking processes / A.M. Bigeev. – M.: Metallurgy, 1982. – 160 p. (Rus.)
2. Bigeev A.M., Metallurgy of steel. Theory and technology of steelmaking / A.M. Bigeev, V.A. Bigeev. – Magnitogorsk: MGTU, 2000. – 544 p. (Rus.)
3. Boichenko B.M. Methodic pointing for students of any specialties to making calculations of converter melting / B.M. Boichenko, S.V. Bochka. – Dnipropetrovsk: NMetAU, 2001. – 25 p. (Ukr.)
4. Dimnich A.H. Methodic pointing for the term paper “Material and thermal balance of converter melting” (for students of speciality 7090401 MBM) / A.H. Dimnich and others. – Donetsk: Don-NTU, 2005. – 44 p. (Ukr.)
5. Harlashin P.S. Methodic pointing for the term paper “Material and thermal balance of oxygen-converter melting for redistribution of usual cast-irons” / P.S. Harlashin, V.Y. Bakst. – Mariupol: PSTU, 2005. – 20 p. (Rus.)
6. Bigeev A.M. The base of mathematic descriptions and calculations of BOF process / A.M. Bigeev, Y.A. Kolesnikov. – M.: Metallurgy, 1970. – 232 p. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 30.10.2013