



ЛІТЕРАТУРА

1. Осадчий В.Я. Технология и оборудование трубного производства [учебник для вузов] / В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец, А.П. Коликов. – М.: «Интернет Инжиниринг», 2001. – 608 с.
2. Грудев А.П. Технология прокатного производства [учебник для вузов] / А.П. Грудев, Л.Ф. Машкин, М.И. Ханин. – М.: Арт-Бизнес-Центр, Металлургия, 1994.– 656 с.
3. Глинков М.А. Общая теория тепловой работы печей / М.А. Глинков, Г.М Глинков. – [2-е изд., перераб. и доп.] – М.: Metallurgy, 1990. – 315 с.
4. ELCUT. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов [руководство пользователя]. – СПб: ООО «Тор», 2013. – 295 с.
5. Арутюнов В.И. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В.И. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников. – М.: Metallurgy, 1990. – 239 с.

УДК 669.184

ВЛИЯНИЕ НЕКОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ЧУГУНА И ЛОМА НА ХОД КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ

В.С. Богушевский¹, А.Э. Скачок², В.Ю. Сухенко³

¹доктор технических наук, профессор кафедры физико-химических основ технологии металлов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина, e-mail: bogysh@gmail.com

²аспирант кафедры физико-химических основ технологии металлов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

³кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры физико-химических основ технологии металлов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина, e-mail: suhenko-victoria@mail.ru

Аннотация. В работе исследовано и разработано методы повышения точности информации о начальных параметрах металлической части шихты для повышения показателей управления конвертерной плавкой.

Ключевые слова: конвертер, чугун, лом, поправка, контроль, вязкость, миксерный шлак, окалина.



INFLUENCE OF UNMONITORED SETTINGS OF IRON AND SCRAP ON PROCESS OF BOF MELTING

V. Bogushevskiy¹, A. Skachok², V. Sukhenko³

¹Doctor of technical Sciences, Professor of Department of Physicochemical Foundations of Metallurgical Processes, [National Technical University of Ukraine - "Kyiv Polytechnic Institute"](http://www.kyivpolytechnic.institute.ua), Kyiv, Ukraine, e-mail: bogysh@gmail.com

²Postgraduate student, Department of Physicochemical Foundations of Metallurgical Processes, [National Technical University of Ukraine - "Kyiv Polytechnic Institute"](http://www.kyivpolytechnic.institute.ua), Kyiv, Ukraine

³Ph.D., senior Lecturer of Department of Physicochemical Foundations of Metallurgical Processes, [National Technical University of Ukraine - "Kyiv Polytechnic Institute"](http://www.kyivpolytechnic.institute.ua), Kyiv, Ukraine, e-mail: suhenko-victoria@mail.ru

Abstract. In this paper we investigate and develop methods to improve the accuracy of the information about the initial parameters of the metallic part of the charge to improve the performance management in BOF melting.

Keywords: BOF, iron, scrap, correction, control, viscosity, mixing slag, dross.

Введение. Составной частью модели управления конвертерной плавкой является статический расчет шихты. Точность последнего в значительной степени зависит от точности контроля исходных параметров. Важнейшими параметрами при шихтовке плавки являются жидкий чугун и металлический лом. Колебание их характеристик сказывается на выходных параметрах конвертерного процесса [1]. Основной характеристикой чугуна является его химсостав, который определяется в пробе, взятой из струи при сливе чугуна из миксера в ковш. Если массовые доли кремния, марганца, фосфора и серы в чугуне довольно точно определяются анализом пробы на квантометре, то содержание углерода в расплаве установить чрезвычайно трудно в связи с кристаллизацией последнего в жидкой фазе насыщенного раствора. Исследования показывают, что учет при шихтовке плавки доли углерода в чугуне позволяет его экономить до 6 кг/т стали [2].

Химсостав металлического лома и его температуру измерить практически невозможно. Учитывая, что масса лома составляет 25 – 27 % от массы металлической части шихты его влияние на процесс чрезвычайно высокое. Также существенно влияет насыпная масса лома, изменяя ход технологического процесса. Так лом с низкой насыпной массой из-за большой удельной поверхности расплавляется быстрее, существенно охлаждая ванну в начальный период продувки, в то время как лом с большой насыпной массой расплавляется медленно, равномерно отбирая тепло в первой половине продувки [3].

Неточная информация о параметрах металлической части шихты приводит к снижению показателей управления конвертерной плавкой, одним



из важнейших среди которых – количество плавков попадающих в заданную марку стали с первой повалки.

Исследования, представленные в статье, проводились в НТУУ „Киевский политехнический институт” по темам „Принципы создания математической модели системы управления кислородным конвертером” и „Математические модели и алгоритмы системы управления кислородным конвертером”, Государственные регистрационные номера 0109U001838 и 0110U002880.

Цель работы. Целью исследований является повышение точности управления конвертерной плавкой за счет снижения влияния неконтролируемых параметров металлической части шихты на результаты управления.

Материалы и результаты исследований. Согласно обобщенным данным многих исследований массовая доля углерода насыщающего чугуна, может быть представлена выражением [4]

$$C_{\text{нас}} = 1,34 + 0,00254t_{\text{ч}} - 0,3\text{Si}_{\text{ч}} - 0,34\text{P}_{\text{ч}} - 0,39\text{S}_{\text{ч}} - 0,045\text{Ni}_{\text{ч}} + 0,024\text{Mn}_{\text{ч}} + 0,05\text{Cr}_{\text{ч}} + 0,14\text{Ti}_{\text{ч}} + 0,08\text{V}_{\text{ч}} \quad (1)$$

где $C_{\text{нас}}$ – массовая доля углерода, насыщающего чугуна, %; $t_{\text{ч}}$ – температура чугуна; $\text{Si}_{\text{ч}}$, $\text{P}_{\text{ч}}$, $\text{S}_{\text{ч}}$, $\text{Ni}_{\text{ч}}$, $\text{Mn}_{\text{ч}}$, $\text{Cr}_{\text{ч}}$, $\text{Ti}_{\text{ч}}$, $\text{V}_{\text{ч}}$ – массовая доля соответствующих элементов в чугуне, %.

Однако расчеты по выражению (1) для выпусков чугуна из доменных печей показали, что фактическая массовая доля углерода в чугуне, $C_{\text{ф}}$, меньше и приближается к концентрации насыщения по мере роста последней.

Для передельного чугуна, сливаемого из миксера, зависимость описывается эмпирическим уравнением

$$C_{\text{ф}} / C_{\text{нас}} = 1 - 0,00065 (t_{\text{ч}} - t_{\text{кр}}) \quad (2)$$

Обработкой экспериментальных данных получено эмпирическое выражение для расчета $t_{\text{кр}}$, выше которой имеет место окисление в чугуне преимущественно углерода,

$$t_{\text{кр}} = -273 + 27500 / [1547 - \lg(\text{Si}_{\text{ч}} / C_{\text{ч}}^2)] - 178\text{Mn}_{\text{ч}}^{1/4} + 150(\text{S}_{\text{ч}} - 0,025)^{1/4} + 5\text{P}_{\text{ч}} + 15\text{S}_{\text{ч}}^{1/3} \quad (3)$$

Отбор пробы чугуна на химический анализ осуществляется по пробе, взятой из струи металла при сливе его из миксера в ковш. Как показали наши исследования, проба является представительной только при полном перемешивании чугуна в миксере. Процесс перемешивания является диффузионным и протекает довольно медленно. В случае недостаточной выдержки чугуна в миксере после залива из доменных ковшей такое усред-



нение не наступает и химсостав чугуна отличается не только на соседних его сливах, но и в пробах, взятых в течение одного слива.

Так нами проведено исследование причин расхождения анализов, взятых на одной плавке в начале и конце слива чугуна из миксера. С этой целью в течение 52 ч было взято 92 пробы от 35 сливов чугуна. Каждую пробу в отдельности нельзя считать представительной. Расхождения в результатах анализа чугуна обной и той же пробы достигали в среднем по углероду 0,07, марганцу 0,08 и кремнию 0,04 %. Расхождения в составе проб во время одного и того же слива составляли в отдельных случаях по углероду 0,18, марганцу 0,17 и кремнию 0,13.

Статистическая обработка результатов исследования показала, что 45,4 % расхождений были обусловлены неточностью анализа, остальные – изменением состава чугуна во время слива. Таким образом, результаты проведенных опытов являются подтверждением мнения некоторых исследователей, считающих, что чугун во время слива из миксера сходит слоями [5].

Исследования, проведенные нами, показали, что для достоверности информации о составе чугуна при сливе его из миксера в ковш необходимо отбирать по три пробы в процессе каждого слива и усреднять массовую долю каждого элемента, определенную по отдельным пробам [6].

Металлическая часть шихты рассчитывается до получения информации о химическом составе чугуна (до слива последнего в ковш и взятия пробы на анализ), по результатам предыдущих сливов, поэтому для уменьшения влияния этого неконтролируемого фактора необходимо прогнозировать состав чугуна. Алгоритм прогнозирования представим в следующем виде:

$$x_i = x_{i*} + \Delta x_i \quad (4)$$

где x_i – массовая доля i -го элемента в чугуне ($x_i \in Si_c, Mn_c, S_c$), находящегося в миксере, %; x_{i*} – расчетное значение массовой доли i -го элемента, %; Δx_i – статистическая поправка, %.

Расчетное значение массовой доли элементов находим по материальному балансу

$$x_{i*} = (x_{im} m_m + \sum_{j=1}^n x_{ijz} m_{jz} - \sum_{j=1}^n x_{ijc} m_{jc}) / (m_m + \sum_{j=1}^n m_{jz} - \sum_{j=1}^n m_{jc}), \quad (5)$$

где x_{im} , x_{ijz} , x_{ijc} – массовая доля элементов в чугуне соответственно в миксере, j -х ковшах, заливаемых в миксер и сливаемых из него, %; m_m , m_{jz} , m_{jc} – масса чугуна соответственно в миксере, j -х ковшах, заливаемых в миксер и сливаемых из него, т; n – число учитываемых ковшей.

Перемешивание чугуна в миксере определяется диффузионным процессом, который зависит от температуры расплава, его вязкости и времени



выдержки новой порции в миксере. Физическая теплота чугуна, сливаемого из доменной печи, тесно коррелирована с массовой долей серы, которая, кроме того, определяет и вязкость чугуна. Учитывая это, можно записать выражение для статистической поправки

$$\Delta x_i = \alpha_{i0} + \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} \delta x_{ij} + \alpha_{i(n+1)} t_{\div} + \alpha_{i(n+2)} m_i, \quad (6)$$

где α_{i0} , α_{ij} , $\alpha_{i(n+1)}$, $\alpha_{i(n+2)}$ – статистические коэффициенты; δx_{ij} – величина, характеризующая массообменный процесс в миксере при сливе в него чугуна j -го ковша

$$\delta x_{ij} = (x_{i\hat{n}} - x_{ijc}) S_{j\zeta} / \Delta \tau_j. \quad (7)$$

Здесь $S_{j\zeta}$ – массовая доля серы в j -м ковше, заливаемом в миксер, %; $\Delta \tau_j$ – продолжительность времени от момента заливки j -го ковша в миксер до момента очередного слива чугуна из миксера, мин.

Параметры t_{\div} , m_m и x_{im} в формулах (6) и (7) соответствуют измеряемым значениям при сливе чугуна из миксера в j -й ковш.

По массиву экспериментальных данных для миксера емкостью 1300 т и 140-тонных чугуновозных ковшей найдены регрессионные уравнения поправок

$$\Delta Si = -1,57 + 356x_{11} + 129,5x_{12} - 36,7x_{13} + 12,5x_{14} + 7,83x_{15} + 0,113 \cdot 10^{-2} t_{\div} + 0,56 \cdot 10^{-4} m_i; \quad (8)$$

$$\Delta Mn = -0,737 + 25,3x_{21} + 24,4x_{22} - 46,5x_{23} + 35,6x_{24} + 0,78x_{25} + 0,74 \cdot 10^{-3} t_{\div} + 0,332 \cdot 10^{-3} m_i; \quad (9)$$

$$\Delta S = -0,0605 + 137x_{31} + 278x_{32} - 6,66x_{33} + 53,4x_{34} + 37,4x_{35} + 0,471 \cdot 10^{-4} t_{\div} + 0,547 \cdot 10^{-5} m_i. \quad (10)$$

Испытания показали, что относительная ошибка данного метода составляет 4 %.

Для контроля массы чугуна в миксере проведены исследования по определению зависимости этого параметра от угла поворота миксера в момент появления струи металла с коррекцией на износ футеровки, определяемый по току нагрузки привода миксера, и на вязкостные свойства чугуна [8]. Исследования показали достаточную для практического использования точность метода.

Одновременно произведена экспериментальная проверка оперативного метода определения массовой доли углерода, основанного на зависимости вязкости жидкого чугуна μ , сливаемого из миксера, от его температуры и доли углерода в нем. Результирующее уравнение имеет вид

$$C_{\div} = 12,08 - 0,562 \cdot 10^{-2} t_{\div} - 0,0546\mu \quad (11)$$



со следующими показателями: коэффициент корреляции равен 0,735, среднеквадратичное отклонение – 0,093 %, достоверность коэффициента корреляции – 0,990.

Контроль вязкости в промышленных условиях осуществлялся при импульсном воздействии на агрегат при сливе чугуна [7]

$$\mu = 4 \ln(m_1 / m_2) / 3\tau, \quad (12)$$

где m_1 , m_2 – масса чугуна, слитого из миксера соответственно за равные первый и второй промежутки времени, τ ; τ – промежуток времени, с.

Так как контроль параметров чугуна с использованием информации о его вязкости производится по ходу слива расплава, значения доли в нем углерода являются средними за время слива, что повышает достоверность измерений.

Влияние миксерного шлака.

Хотя миксерный шлак присутствует с самого начала продувки, отсутствие в нем компонентов, обуславливающих жидкотекучую реакционно-основную способность, изменяет характер процессов в ванне и прежде всего шлакообразования. В начальные условия вносится возмущение, которое при экстремальном стечении обстоятельств может настолько нарушить технологический режим продувки, что произойдут такие нежелательные явления, как выбросы.

Расчеты по балансовой линейной модели оценки изменения выходных параметров продувки показывает, что миксерный шлак, попадая в конвертер, ведет себя как охладитель. Холодное начало продувки также усугубляют низкие значения температуры чугуна, массовой доли в нем марганца и кремния, большой расход лома низкой насыпной плотности ($0,7 \text{ т/м}^3$) и др. При этом в первом периоде продувки наблюдается значительное переокисление металла и шлака в виде накопления оксидов железа, так как массоперенос в ванне замедлен. В дальнейшем эти факторы после разогрева ванны приводят к интенсивному неравномерному окислению углерода и быстрому растворению извести за счет активного ассимилирующего влияния оксидов железа. Все это может привести к выбросам в середине продувки в виде механических потерь металла, достигающих иногда 2...5 % от массы чугуна [8].

В случае попадания в конвертер миксерного шлака вместе с чугуном масса последнего уменьшается, что приводит, с одной стороны, к недогреву ванны и увеличению основности конечного шлака, а с другой – к уменьшению основности, так как часть присаживаемой извести тратится на ошлакование SiO_2 миксерного шлака, и пережегу углерода, который окисляется стехиометрически с учетом неизменного объема кислородного



дутья. При этом приращение энтальпии расплава от теплоты химической реакции не происходит.

Что касается металлического лома, то содержание углерода в нем меняется в широких пределах, что существенно сказывается на показателях плавки. Наши исследования показали, что попадание 1 % окалины (ржавчины) от массы лома в конвертер снижает конечное содержание углерода при неизменном количестве дутья на плавку на 0,05 %. Эта величина является критической для средне- и низкоуглеродистых марок стали. Единственным средством контроля насыпной плотности лома является количество заваливаемых совков на плавку. Но такой контроль является грубым. Поэтому наиболее рациональный метод исключения влияния этих возмущающих воздействий – усреднять лом на скраповом дворе по химическому составу, насыпной плотности и засоренности. Для этого лом разного химсостава, насыпной массы и засоренности должен храниться в разных буртах, при этом чем лучше произведена дифференциация по буртам, тем лучше будут показатели плавки.

Результаты расчета удельных показателей воздействия неконтролируемых возмущений ванны на конечные параметры продувки сведены в табл. 1.

Таблица 1. Влияние неконтролируемых возмущений ванны на конечные параметры продувки

Возмущение	Воздействие на конечные параметры		
	Массовая доля углерода в металле, %	Температура металла, °С	Основность шлака
Замена 1 % массы лома: песком ржавчиной (окалиной)	–	– 3,33	– 0,286
	– 0,05	– 5,86	–
Попадание 1 % окалины от массы лома	– 0,05	– 9,7	–
Замена 1 % массы чугуна миксерным шлаком	– 0,033	– 16,04	– 0,65
Попадание 1 % миксерного шлака от массы чугуна	– 0,032	– 14,0	–



Выводы. Управление конвертерной плавкой существенно зависит от наличия своевременной информации о параметрах чугуна и лома. В сложившихся условиях производства целесообразно использовать прогноз содержания кремния, марганца и серы в чугуне по балансово-статистическим соотношениям химсостава и массы заливаемых в миксер и сливаемых из него ковшей. Содержание углерода в чугуне можно определять на основании соотношений насыщения или измеряя его вязкостные характеристики.

Миксерный шлак должен тщательно скачиваться с поверхности заливаемых ковшей.

Исключение влияния неконтролируемых характеристик металлического лома возможно путем его усреднения на скраповом дворе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: підручник / Д.Ф.Чернега, В.С.Богушевський, Ю.Я.Готвянський та ін.; За ред. Д.Ф.Чернеги, Ю.Я.Готвянського. – К.: Вища школа, 2006. – 503 с.
2. Казаков А.А. О влиянии содержания углерода в чугуне на тепловой баланс конвертерной плавки / А.А. Казаков, И.П. Гриневиц, В.И. Веремейчиков и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1984. – № 2. – С. 14 – 15.
3. Бойченко Б.М. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія: Підручник / Бойченко Б.М., Охотський В.Б., Харлашин П.С. – Дніпропетровськ: РВА "Дніпро-ВАЛ", 2004. – 454 с.
4. Охотский В.Б. Формирование содержания углерода в чугуне для сталеплавильных процесов / В.Б. Охотский // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1994. – № 4. – С. 13 – 15.
5. Петров А.Г. Расчет состава чугуна, сливаемого из миксера для конвертерной плавки / А.Г. Петров, Д.И. Туркенич // *Сталь*. – 1971. – № 6. – С. 494 – 496.
6. Прогнозирование параметров чугуна в миксере / В.И.Гранковский, В.Н.Погорелов, В.В.Вечкутов и др. // *Изв. Вузов. Чер. металлургия*. – 1975. – № 2. – С. 138 – 141.
7. Богушевський В.С. Контроль в'язкісних характеристик чавуна в системі керування конвертерною плавкою / В.С. Богушевський, К.В. Єгоров, О.Е. Скачок, В.Ю. Сухенко // *Технологічні комплекси*. – 2013. – № 2 (8). – С. 72 – 75.
8. Баптизманский В.И. Теория кислородно-конвертерного процесса / Баптизманский В.И. – М.: Металлургия, 1975. – 376 с.