

УДК 669.184

Назюта Л.Ю.¹, Денисенко В.С.²

АНАЛИЗ ОКИСЛЕННОСТИ КОНЕЧНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ВЫПЛАВКЕ СТАЛИ В БОЛЬШЕГРУЗНЫХ КОНВЕРТЕРАХ

В работе приведен опыт использования зонда – активометра Celox, дополненный современным регистрирующим прибором Multi-Lab Celox в условиях 350-т конверторов ПАО «МК «Азовсталь». По данным текущего производства трубной стали X70 изучено равновесие кислорода между металлом и шлаком в конце рафинирования. Показано, что значительный разброс данных по активности кислорода обусловлен недостаточно качественным замером, а также влиянием состава шлака. Как показали результаты анализа, в зависимости от содержания углерода в металле и состава шлака активность кислорода в конце рафинирования изменяется в широких пределах (0,033-0,116 %) и в среднем составляет 0,072 %. При содержании углерода в металле более 0,05 % существенное влияние на активность кислорода оказывает реакция окисления углерода. Отклонения фактических значений активностей кислорода от равновесных с углеродом относительно и составляет около 0,02 %. При содержании углерода менее 0,04 % доминирующее влияние на активность кислорода в металле оказывает окислительный потенциал шлака. В связи с этим все мероприятия, направленные на его снижение, окажут положительное влияние на расход раскислителей.

Ключевые слова: активность, активометр, равновесие, спектрографический анализ, электродвижущая сила.

Назюта Л.Ю., Денисенко В.С. Аналіз окисленості кінцевого металу при виплавці сталі у великовантажних конвертерах. У роботі наведено досвід використання зонду – активометру Celox, доповнений сучасним реєструючим приладом Multi-Lab Celox в умовах 350-т конвертерів ПАТ «МК «Азовсталь». По даним поточного виробництва трубної сталі X70 вивчена рівновага кисню між металом та шлаком наприкінці рафінування. Показано, що значний розкид даних по активності кисню обумовлений недостатньо якісним виміром, а також впливом складу шлаку. Як показали результати аналізу, залежно від змісту вуглецю в металі й складу шлаку активність кисню наприкінці рафінування змінюється в широких межах (0,033-0,116 %) і в середньому становить 0,072 %. При зміні вуглецю в металі більш 0,05 % істотний вплив на активність кисню виявляє реакція окислення вуглецю. Відхилення фактичних значень активностей кисню від рівноважних з вуглецем відносно й становить близько 0,02 %. При зміні вуглецю менш 0,04 % домінуючий вплив на активність кисню в металі виявляє окисний потенціал шлаку. У зв'язку з цим, усі заходи, спрямовані на його зниження, вплинуть на витрату розкислювачів.

Ключові слова: активність, активометр, рівновага, спектрографічний аналіз, електродвижущая сила.

L.Y. Nazuta, V.S. Denisenko. Analysis of oxidation of the final metal in the smelting of steel in supersize converters. This work shows the experience of using of sensor – oxygen activity control Celox, complete with modern registering device Multi-Lab Celox in conditions of 350-ton converters of Azovstal Iron and Steel Works. According to the current production of tube steel X70 balance of oxygen between metal and slag in the end of refining is studied. It is shown that a considerable spread of data on oxygen activity due to insufficient quality measurements, as well as the influence of the slag. As have shown results of the analysis, depending on the carbon content in the metal and the composition of the slag oxygen activity at the end of refining varies widely (0,033-0,116 %) and an average is 0.072 %. When the carbon content in the metal more than 0,05 % a significant ef-

¹ д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

fect on the activity of oxygen has the reaction of oxidation of carbon. Deviation of the actual values of oxygen activity in equilibrium with carbon rather and is about 0.02 %. When the carbon content is less than 0,04 % the dominant influence on the activity of oxygen in the metal has the oxidation potential of the slag. Specifically, all actions directed at its reduction, will make positive impact on the consumption of deoxidizers.

Key words: activity, activity control, balance, spectrographic analysis, the electromotive force.

Постановка проблеми. Одной из важнейших проблем металлургии является постоянный рост требований к качеству выплавляемого металла и особенно при производстве низкоуглеродистых марок сталей. Так, например, при производстве штрипсового металла для труб большого диаметра за последние годы резко повысились требования по показателям прочности, хладноломкости, свариваемости, а для автолистовых сталей – требования по прочности, штампуемости, коррозионной стойкости – увеличились в несколько раз.

Если раньше обеспечение требуемых качественных показателей металла достигалось в основном за счёт чистоты стали по углероду, вредным примесям и неметаллическим включениям, то в настоящее время определяющее влияние на качественные характеристики оказывают не только абсолютное содержание неметаллических включений, но и их состав, форма, распределение и деформируемость при прокатке.

Оксидные неметаллические включения представляют собой конденсированную фазу, которая формируется в процессе раскисления металла элементами раскислителями. В малоуглеродистой легированной алюминием стали (содержание Al не менее 0,02%) неметаллические включения представлены в виде недеформирующихся частиц корунда (Al_2O_3).

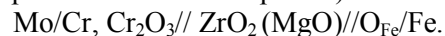
Их количество зависит от содержания кислорода в металле перед раскислением и степени удаления продуктов раскисления. Чем больше содержание кислорода в металле перед началом раскисления, тем больше оксидных включений в готовой стали. При этом следует отметить, что при использовании осаждающего способа раскисления получить чистую от неметаллических включений сталь – практически не возможно.

В связи с этим научный и практический интерес представляют исследования окисленности ванны большегрузных конвертеров в конце рафинирования, в том числе влияния состава металла и шлака на активность кислорода в конечном металле.

Исследования проводили в условиях 350-т конвертеров ПАО «МК «Азовсталь». Активность кислорода в металле определяли с помощью зонда – активометра (зонд Celox – производитель бельгийская фирма Heraeus), который на протяжении многих лет используется на крупных металлургических фирмах за рубежом.

В Украине зондом Celox в настоящее время пользуются многие металлургические предприятия отрасли.

Анализ последних исследований и публикаций. Первые опыты по использованию зонда – активометра Celox для определения активности кислорода в металле в конце рафинирования стали в кислородных конвертерах были проведены в Германии около 40 лет назад [1-3]. В них были использованы высокотемпературные элементы (определение активности кислорода в металле основывается на электрохимическом измерении) с ячейками:



В них в качестве электрода сравнения используется электрод в виде хрома и его оксида, датчика электродвижущей силы (э.д.с.) – твердый стабилизированный оксидом магния циркониевый элемент; а также Pt – Rh термopара для измерения температуры. Контакт с ванной осуществляется с помощью молибденового стержня.

При погружении зонда в расплав измеряются и регистрируются на двухканальном самописце э.д.с. ячейки и термо-э.д.с. термopары, которая необходима для расчета активности кислорода.

Связь между активностью кислорода (a_O), э.д.с. (E) и температурой (T , К) определяется по закону Нернста:

$$E = \frac{RT}{nF} \cdot \ln \frac{a_O}{a_H^+}, \quad (1)$$

где n – число переноса ($n = 2$ для раствора);

$R = 8,313$ Дж/(К · моль) – универсальная постоянная;

$F = 96580$ Кл/моль – постоянная Фарадея;
 a'_O – активность кислорода в электроде сравнения.

Для использования в зонде Celox данного гальванического элемента активность кислорода в металле, как правило, определяют по методическому выражению (2), заложенному в методике использования зонда:

$$\log a_O = 1,34 + 0,0059 \cdot (E + 0,54 \cdot (t - 1550) + 0,0002 \cdot E \cdot (t - 1550)), \quad (2)$$

где a_O – активность кислорода в стали, ppm;
 t – температура жидкой стали, °C.

Расчет содержания углерода в металле выполняют с использованием уравнений, которые получают на основе статистической обработки данных текущего производства для конкретного агрегата (предприятия) индивидуально.

В настоящее время кислородные зонды Celox, дополненные современными регистрирующими приборами Multi-Lab Celox, являются одними из наиболее надежных и востребованных устройствами контроля и управления окислительно-восстановительными процессами в металлургии.

Датчик обеспечивает точные данные о температуре и активности кислорода в металле, на основании которых рассчитывается содержание углерода в расплаве и даются рекомендации по расходу основного раскислителя – алюминия.

Область применения активометров расширяется, их используют при выплавке и внепечной обработке различных марок стали. В том числе низкоуглеродистой для глубокой вытяжки, коррозионно-стойкой, подшипниковой, а также легированной титаном и другими легкоокисляющимися элементами.

При этом в зарубежных и отечественных публикациях [4, 5] неоднократно отмечалось, что при определении активности кислорода в нераскисленной стали в области низких концентраций углерода (менее 0,05 %) наблюдается значительный разброс экспериментальных данных. Это объясняется наличием окислительного шлака и неравномерностью состава ванны. Содержание кислорода в подшлаковом слое при низких содержаниях углерода в значительной степени определяется кислородным потенциалом шлака.

Поэтому при выплавке стали в большегрузных конвертерах надежность измерения активности кислорода может быть обеспечена только при условии представительного проведения измерений. Расчет содержания углерода в металле необходимо производить с учетом влияния активности кислорода шлака, который должен учитываться специальными коэффициентами. При этом, учитывая значительный разброс данных активности кислорода в конечном металле (по данным различных авторов, независимо от типа применяемых приборов, активность кислорода нераскисленной стали составляет 0,06-0,18 % [3-5]), а также важность этих показаний для дальнейшего проведения операций раскисления и легирования особое внимание следует уделять изучению окислительного потенциала шлака и его влиянию на активность кислорода в металле [8].

Цель работы – изучить состояние равновесия между металлом и шлаком в конце окислительного рафинирования при выплавке стали в большегрузных конвертерах верхнего дутья.

Результаты исследования. Работа выполнена в условиях большегрузных 350-т конвертеров ПАО «МК «Азовсталь». Сортамент выплавляемой стали на этом предприятии представлен в основном низкоуглеродистыми, легированными марками стали (более 75 % общего объема), которые требуют высокого расхода ферросплавов и легирующих. За последние пять лет 25-28 % выплавляемого металла приходится на долю трубных марок стали.

Среди трубных марок стали на мировом рынке наиболее востребованной является сталь категории прочности X70. При этом требования к её качеству с каждым годом возрастают (комбинат неоднократно получает заказы на вакуумированную сталь, а также с регламентированным содержанием неметаллических включений).

Базовая технология производства трубной стали X60-X80 в условиях ПАО «МК «Азовсталь» включает в себя несколько этапов. Полупродукт выплавляют в 350-т конвертерах. В настоящее время на этом предприятии в основном используют низкомарганцовистый (содержание марганца 0,13-0,18 %), физически холодный чугуна (более 60 % чугуна с температурой ниже

1300 °С) с нестабильным содержанием кремния (0,46-0,98 %). Несмотря на это, средний расход лома в металлошихте конвертеров достаточно велик – около 20 % от ее массы. Расход шлакообразующих для ошлакования кремния составляет (кг/т шихты): 42-55 извести, 13-45 доломита. Плавиковый шпат для разжижения практически не применяется. Для снижения активности окислов железа шлака в конце продувки в ванну загружают около 2 кг/т шихты брикеты доломитовые углеродистые (БДУ), содержащие 10-12 % углерода и 13-20 % MgO. Продолжительность плавки в среднем составляет около 14 мин; интенсивность подачи кислорода – 46 м³/т шихты. В конце рафинирования получают полупродукт с содержанием углерода 0,03-0,08 % и температурой 1626-1680 °С (средняя температура 1660 °С).

После конвертирования во время выпуска металла в ковш вводят основную часть раскислителей и шлакообразующие (ТШС). Для повышения скорости их усвоения металл продувают инертным газом через донные фурмы с расходом 50-60 м³/час. Расход алюминия определяют по результатам замера активности кислорода зондом – активометром. Как правило, его расход составляет 1,4-2,6 кг/т шихты (70-75 % от общего расхода).

Затем металл передают на установку ковш-печь (УКП). В период доводки на УКП производят нагрев металла, его рафинирование по сере, а также окончательное раскисление присадками FeSi, Al, FeMn и/или металлического марганца. Легирующие преимущественно вводят в составе порошкообразной проволоки. Частичное удаление и модифицирование неметаллических включений производят силикокальцием и наводкой основного шлака, который формируют присадками извести и плавикового шпата.

Для измерения окисленности металла используют зонды Celox-Al и регистрирующий прибор Multi-Lab Celox II. Расчет активности кислорода (a_O) выполняют по методическому выражению (2), заложенному в методике использования зондов.

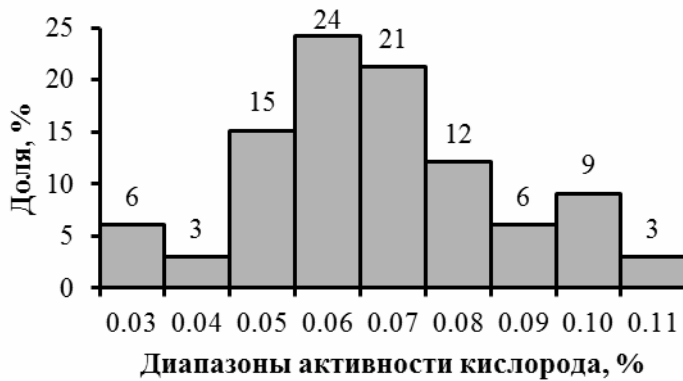


Рис. 1 – Распределение активности кислорода в металле в конце рафинирования

(кварцевый стаканчик диам. 10-12 мм и длиной около 100 мм) закрепляют непосредственно на штанге. Активность кислорода измеряют одновременно с замером температуры, а также отбором проб металла и шлака для спектрографического анализа.

В процессе исследования были проанализированы результаты контроля окисленности металла в конце продувки более 100 плавок трубной стали X70 текущего производства. Как показали результаты анализа, в зависимости от содержания углерода в металле активность кислорода в конце рафинирования изменяется в широких пределах (0,033-0,116 %) и составляет в среднем 0,072 %. Гистограмма частоты распределения активности кислорода в конечном металле представлена на рис. 1.

Как отмечалось ранее, в области низких содержаний углерода по результатам измерения активности кислорода, делать надёжные выводы о содержании углерода в конечном металле не всегда представляется возможным. В связи с этим нами были сопоставлены результаты определения содержания углерода в пробе металла спектрографическим способом (по прибору Спектравак 2000) и расчётные значения, полученные с помощью активометра Multi-Lab Celox.

Представленный на рис. 2 сравнительный анализ показал, что содержание углерода в металле на повалке, выполненный спектрометрическим методом и расчётные значения только в 27 случаях из 100 совпадают, в основном при содержании углерода менее 0,05 %. По нашему мнению, это связано с недостаточной точностью градуировки прибора и/или с некачественными замерами активности.

Зонд вводят в расплав вертикально с помощью штанги с размером штатной термопары, глубина погружения которой должна быть 300-400 мм ниже уровня шлака. Для повышения точности измерений пробницу

закрепляют непосредственно на штанге. Зонд вводят в расплав вертикально с помощью штанги с размером штатной термопары, глубина погружения которой должна быть 300-400 мм ниже уровня шлака. Для повышения точности измерений пробницу

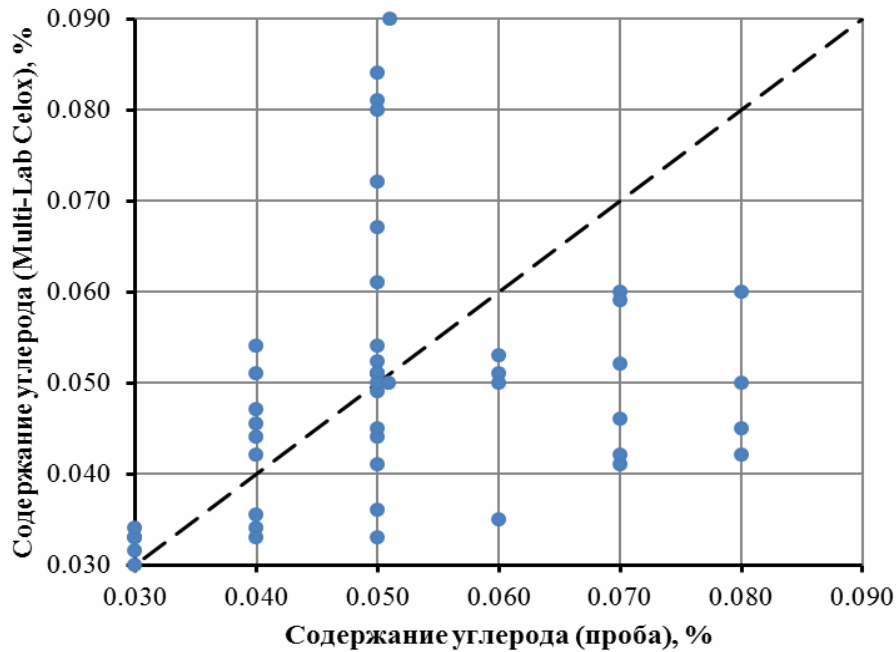


Рис. 2 – Сравнительный анализ содержания углерода в конечном металле (методом спектрографического анализа) с расчетным содержанием по показаниям прибора Celox

Наиболее значительный разброс данных наблюдается при содержании углерода 0,05 %. Диапазон изменения активности кислорода на таких плавках составляет 0,052-0,095 %. Значительные колебания активности кислорода свидетельствуют об отсутствии термодинамического равновесия между кислородом и углеродом и делает последующий процесс усвоения раскислителей неконтролируемым. По мнению [7], максимальное приближение к состоянию термодинамического равновесия реакция обезуглероживания достигает в кислородных конвертерах малой емкости или с донной продувкой.

При выплавке стали в большегрузных конвертерах отклонение реакции окисления углерода от состояния равновесия зависит от многих факторов, в том числе от интенсивности продувки ванны, состава шлака и его физико-технических свойств. Поэтому делать выводы о содержании углерода в металле по данным активометра Celox можно только в ограниченных пределах.

В связи с существенным разбросом экспериментальных данных от линии равных концентраций, полученные значения активности кислорода в металле были сопоставлены с равновесными значениями с углеродом и шлаком.

Равновесную с углеродом активность кислорода (a_O^C) при нормальном давлении 0,1 МПа определяли по рекомендуемому Г. Кньюпелем уравнению Банья и Матоба [6]:

$$\log K_{C-O} = \log 1/[C] \cdot a_O^C = -1160/T + 2,00 \quad (3)$$

Расчеты проводили с учетом температуры и состава проб металла (определенных спектрографическим способом) для каждого опыта индивидуально. Полученные данные сопоставляли с фактической активностью кислорода, замеренной прибором Celox – рис. 3.

Как следует из представленных данных, в исследованных условиях на всем диапазоне изменений содержания углерода, активность кислорода в металле на 0,016-0,025 % (абс.) выше равновесных значений с углеродом при P=0,01 МПа. Эта зависимость имеет экспоненциальный характер и может быть описана уравнением (4), которое получено на основании статистической обработки опытных данных:

$$a_O = 28,5 \cdot 10^{-4}/[C] + 0,013, \quad R^2 = 0,671. \quad (4)$$

При содержании углерода в конечном металле более 0,05 % средняя активность кислорода изменяется незначительно и составляет 0,06-0,07 %.

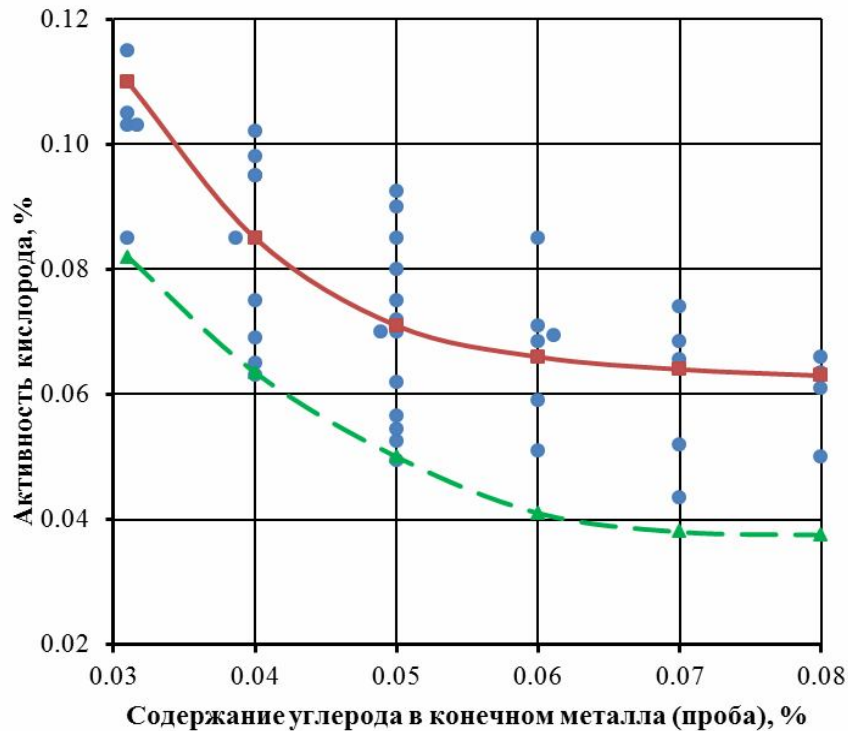


Рис. 3 – Зависимость между активностью кислорода, замеренной в конвертере активометром Multi-Lab Celox и содержанием углерода в конечном металле (проба): 1 – Среднее значение a_O ; 2 – Равновесная активность кислорода с углеродом – a_O^E

Снижение содержания углерода в металле сопровождается более резким изменением активности кислорода. Однако степень отклонения системы от равновесия с углеродом остается практически постоянной. Превышение фактической активности кислорода над равновесной с углеродом составляет в среднем $\Delta a_O = a_O - a_O^E = 0,020 \%$.

При этом следует отметить, что если в качестве основного параметра взять содержание углерода, рассчитанное по данным активометра, эта величина будет в два раза меньше (0,008-0,014 %). По нашему мнению, это указывает на системную ошибку прибора при расчете содержания углерода в конечном металле.

Фиксируемое нами на опытных плавках отклонение системы углерод – кислород от состояния равновесия почти в три раза больше значений, полученных в условиях 300-т конвертеров НЛМК Россия) с комбинированной продувкой ванны и кратковременным перемешиванием аргоном нераскисленной стали в ковше в течение трех минут перед замером активности кислорода отечественным прибором УКОС [4]. По их данным сверхравновесная активность кислорода независимо от содержания углерода составляет около 0,007 %.

По уровню окисленности конечного металла и степени отклонения системы от термодинамического равновесия с углеродом представленные на рис. 3 результаты хорошо согласуются с данными зарубежных авторов, полученных с использованием активометра Celox [1-3, 7], а также с результатами исследований окисленности конечного металла в условиях ЗСМК с помощью УКОС [5]. В этой работе авторы впервые обратили внимание на существенное влияние на окисленность металла состава шлака, а также додувок металла (увеличивают активность кислорода в металле в среднем на 0,005 %/мин).

В ранее опубликованных работах также неоднократно подчеркивалось, что активность кислорода в металле, и особенно в подшлаковом слое, в значительной степени определяется окисленностью шлака. В связи с этим, учитывая недостаточную воспроизводимость показаний активометров на плавках с додувками последние были исключены из общего анализируемого массива данных.

Более полную информацию о процессах распределения кислорода между металлом и шлаком можно получить при анализе окислительной способности шлака, которая характеризуется коэффициентом распределения кислорода $L_O = f(t)$ и активностью в нем оксидов железа

a_{FeO}

$$[a_O]_P^{мет} = L_O \cdot a_{FeO}, \quad (5)$$

где $[a_O]_P^{мет}$ – равновесное со шлаком содержание кислорода, %.

Влияние температуры на коэффициент распределения кислорода между металлом и шлаком считали по данным [9]:

$$\log L_O = \log [O]/a_{FeO} = -6230/T + 2,734. \quad (6)$$

Согласно расчетам при средней температуре ванны 1660 °С: коэффициент распределения кислорода между металлом и шлаком составляет $L_O = 0,291$. В этих условиях в равновесии с чистым оксидом железа в металле находится $[a_O]_{max}^{мет} = 0,291$ %.

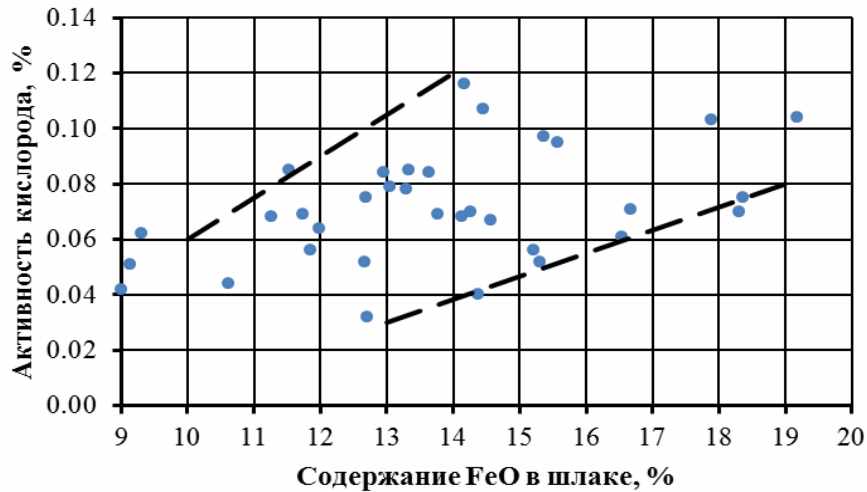


Рис. 4 – Влияние окисленности шлака на активность кислорода в металле на повалке конвертера

В исследуемых условиях в конце продувки в зависимости от температуры металла коэффициент распределения кислорода между металлом и шлаком составляет $L_O = 0,238 - 0,361$. При этом равновесная со шлаком активность кислорода будет зависеть от состава шлака, что и наблюдалось на опытном массиве данных – рис. 4.

Активность оксида железа (II) в шлаке определяли с использованием теории регулярных ионных растворов В.А Кожеурова [10]. По принятой модели шлак состоит из простейших катионов, окружённых общим анионом кислорода ($-O^{2-}$). Так как он является единственным анионом в шлаке, то его ионная доля и активность $a_{O^{2-}} = 1$. В расчетах массовые проценты компонентов шлака переводятся в число молей на 100 г шлака. Активность оксида железа рассчитывается с поправкой на коэффициент активности катиона железа (II) $\gamma_{Fe^{2+}}$, который определяют по уравнению (8):

$$a_{FeO} = x_{Fe^{2+}} \cdot \gamma_{Fe^{2+}}, \quad (7)$$

где $x_1 - x_6$ соответственно ионные доли Fe^{+2} , Mn^{+2} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Si^{+4} , P^{+5} .

$$\lg \gamma_1 = \lg \gamma_{Fe^{2+}} = \frac{1000}{T} [2,18x_2x_5 + 5,90(x_3 + x_4)x_5 + 10,50x_3x_6]. \quad (8)$$

Согласно расчетам при среднем составе шлака масс. доля, %: $CaO = 45,86$, $MgO = 7,47$, $FeO = 13,94$, $SiO_2 = 15,96$, $P_2O_5 = 0,63$ ($x_1 = 0,54$, $x_2 = 0,13$, $x_3 = 0,13$, $x_4 = 0,19$, $x_5 = 0,05$) и температуре ванны – 1660 °С расчетные величины параметров по уравнениям (5-8) составят: $a_{FeO} = 0,33$ м.д., $\gamma_{Fe^{2+}} = 2,54$, а активность кислорода в металле при равновесии с этим шлаком будет равна $[a_O]_P^{мет} = 0,096$ %. Эта величина очень часто совпадает с замеренной активностью кислорода в металле при выплавке низкоуглеродистых марок стали. При изменении температуры и состава конечного шлака, которое имеет место в условиях комбината, активность a_{FeO} изменяется в пределах 0,24-0,37 м.д., а равновесная со шлаком активность кислорода составля-

ет $[a_O]_F^{мет}$ = 0,073-0,120 %.

Наибольшее отклонение от средней активности кислорода наблюдалось на плавках с додувками ванны. При исключении их из общего числа анализируемых плавков влияние содержания углерода в ванне на фактическую и равновесную с углеродом и шлаком (область термодинамического равновесия металла и шлака выделена) активность кислорода в конечном металле представлена на рис. 5.

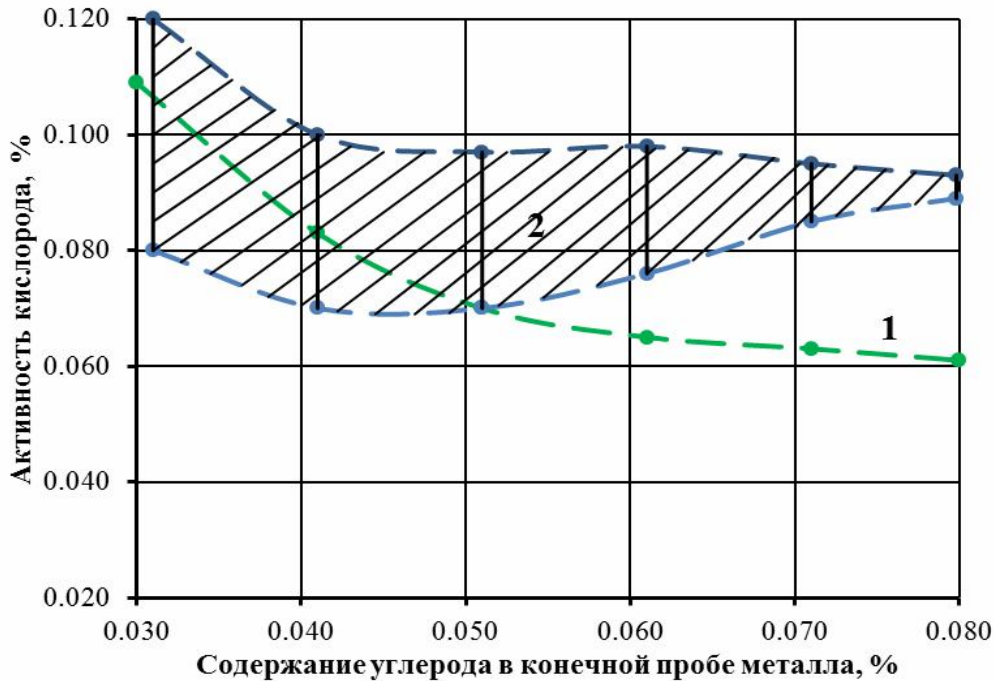


Рис. 5 – Залежність між фактичною активністю кисню, заміреною акти-
 вометром (Multi-Lab Celox), кислородним потенціалом шлаку і вмістом вугле-
 рода в кінцевій пробі металу: 1 – Середнє значення a_O ; 2 – Область (заштрихова-
 но) активності кисню в рівновазі со шлаком – $[a_O]_F^{мет}$

Как следует из представленных данных, если в качестве основного параметра выступит содержание углерода в пробе конечного металла, определяемого спектрографическим методом, то при содержании углерода в ванне менее 0,04 % активность кислорода в металле по данным замера Celox практически совпадает с равновесными значениями со шлаком. При содержании углерода более 0,05 % влияние окисленности шлака на активность кислорода в металле постепенно снижается. Это отражает общие закономерности верхнего конвертирования, в том числе изменение состава и температуры металла по высоте конвертера и, особенно, в отсутствии перемешивания ванны пузырями окиси углерода.

Содержание углерода, рассчитанное по показаниям прибора Celox, дает другие результа-
 ты. Согласно им активность кислорода в металле примерно на 0,01 % превышает равновесное
 содержание с углеродом и практически постоянно на всем диапазоне изменения концентраций
 углерода. Это искажает реальную картину распределения кислорода между металлом и шла-
 ком, и снижает актуальность работ по стабилизации и снижению окисленности шлака.

Выводы

Представленный в данной работе анализ окисленности конечного металла и шлака при
 выплавке низкоуглеродистой стали в большегрузных конвертерах верхнего дутья показал, что в
 результате высоких скоростей рафинирования ванны реакция окисления углерода не достигает
 состояния равновесия. Активность кислорода в металле на повалке конвертера изменяется в
 широких пределах. Замеры выполненные с использованием активометров нестабильны. Поэто-
 му получить однозначные рекомендации по расходу раскислителей в общем случае не пред-
 ставляется возможным.

Для стабилизации температуры и состава конечного металла следует избегать додувок, а
 также сделать более сбалансированным тепловой баланс процесса.

Список использованных источников:

1. Фиге Л., Гердом К.-Х., Кайзер Х.-П., Шеффер Х. Применение зондов-активометров при раскислении алюминием сталей для глубокой вытяжки / Л. Фиге, К.-Х. Гердом, Х.-П. Кайзер, Х. Шеффер // Черные металлы. – 1984. – № 1. – С. 10-14.
2. Шооп И., Реш В., Манн Г. Применение зондов-активометров в кислородно-конвертерном производстве / И. Шооп, В. Реш, Г. Манн // Черные металлы. – 1976. – № 6-7. – С. 35-40.
3. Шооп И., Фляйге Г., Уилински Г. и др. // Черные металлы. – 1984. – № 1 – С. 20-21.
4. Свяжин А.Г., Рябов В.В., Романович Д.А и др. Использование кислородных зондов для контроля окисленности и процесса раскисления малоуглеродистой стали / А.Г. Свяжин, В.В. Рябов, Д.А. Романович и др. // Сталь. – 1996. – № 2. – С. 12-16.
5. Гальперин Г.С., Бученков А.К., Александров А.И., Болотников В.В. Исследование окисленности стали в 350-т конвертерах / Г.С. Гальперин, А.К. Бученков, А.И. Александров, В.В. Болотников // Сталь. – 1996. – № 1. – С. 28-29.
6. Кнюппель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Часть 1. Термодинамические и кинетические закономерности / Г. Кнюппель // Москва, Металлургия. – 1973.
7. Плюшкель В. // Черные металлы. – 1976. – № 14. – С. 14-18.
8. Герман В.И., Добромилов А.А., Саврасов А.И., Швецов А.Н. Стабилизация окисленности кипящей стали / В.И. Герман, А.А. Добромилов, А.И. Саврасов, А.Н. Швецов // Сталь. – 2000 – № 6. – С. 28-30.
9. Меджибожский М.Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов / Киев-Донецк. – Вища шк. Головн. Изд-во, 1986. – 280 с.
10. Кожеуров В.А. Термодинамика металлургических шлаков / В.А. Кожеуров // Свердловск. Изд-во ГНТИЛ. – 1955. – 164 с.

Рецензент: А.А. Казаков
д-р техн. наук, проф., СПБГПУ

Статья поступила 28.03.2011

УДК 621.746.62:669.189

Федосов А.В.¹, Бурлаков В.И.², Ларионова С.В.³

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ТВЕРДОЙ КОРКИ СТАЛИ,
ФОРМИРУЮЩЕЙСЯ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ СЛЯБОВЫХ МНЛЗ**

Предложен комплексный подход к решению задачи математического моделирования процессов теплового и механического взаимодействия формирующейся корочки непрерывно-литого сляба со стенками кристаллизатора МНЛЗ. Предложенный подход позволяет рассчитать распределение температуры, усадки, механических напряжений и геометрическое искажение профиля сляба в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, кристаллизатор, конусность, сляб, усадка.

Федосов А.В., Бурлаков В.И., Ларионова С.В. Дослідження деформації твердої кірки сталі, яка формується в кристалізаторі МБЛЗ. Запропоновано комплексний підхід до розв'язання задачі математичного моделювання процесів теплової та механічної взаємодії кірки безперервно-литого слябу, що формується, зі стінками кристалізатора МБЛЗ. Запропонований підхід дозволяє розраховувати розподіл температури, усадки, механічних напружень та геометричних спотворення профілю сляба в кристалізаторі слябової МБЛЗ.

Ключові слова: машина безперервного лиття заготовок, кристалізатор, конусність, сляб, усадка.

¹ канд. техн. наук, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² канд. техн. наук, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

³ ассистент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь