

УДК 669.184.2.66

©Лухтура Ф.И.*

**О КРИТИЧЕСКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ УГЛЕРОДА
В РАСПЛАВЕ КОНВЕРТЕРА**

Рассмотрены причины изменения скорости обезуглероживания и образования характерных особенностей на кинетической кривой процесса обезуглероживания расплава в заключительный период продувки конвертерной ванны. Показана их зависимость от параметров истечения кислородного потока из сопел фурм для верхнего и донного дутья, и других параметров продувки.

Ключевые слова: конвертер, фурма, сопло, сверхзвуковой поток, расплав, эжекция, обезуглероживание.

Лухтура Ф.И. Про критичну концентрацію вуглецю в розплаві конвертера. Розглянуті причини зміни швидкості окислення вуглецю і утворення характерних особливостей на кінетичній кривій процесу окислення вуглецю у розплаві в заключний період продувки конвертерної ванни. Показана їх залежність від параметрів витікання кисневого потоку з сопел фурм для верхнього і донного дуття, та інших параметрів продувки.

Ключові слова: конвертер, фурма, сопло, надзвуковий потік, розплав, ежекція, окислення вуглецю.

F.I. Lukhtura. On critical concentration of carbon in converter melt. Investigated were the reasons of changes in speed carbon oxidation and formation of specific features on a kinetic curve of a decarburizing process of a melt in a final period of a converting surveyed. Their relation to parameters of the expiration of an oxygen stream from lance nozzles for the top and bottom blast and other blast parameters was shown.

Keywords: converter, lance, nozzle, supersonic flow, melt, ejection, carbon depletion.

Постановка проблемы. Критическая концентрация углерода является одним из показателей процесса обезуглероживания расплава, перемешивания конвертерной ванны и физико-химического взаимодействия дутьевых потоков окислителя с расплавом, по величине которой судят о состоянии ванны в тот или иной период продувки, ее окисленности при верхней продувке и др.

Анализ последних исследований и публикаций. Согласно Б.В. Старку и С.И. Филлипову [1, 2], в период продувки окислительным газом расплава в лабораторных условиях, при снижении углерода в нем до так называемой критической концентрации, происходит смена лимитирующего звена процесса (с кислородного на углеродный). Начинается снижение скорости обезуглероживания и вблизи этого значения происходит переход от «поверхностного» реагирования к объемному «кипению» (обезуглероживанию) ванны. Однако, по мнению ряда авторов [3-7], вышеприведенная теория не может объяснить всю сложность реального процесса, т.к. могут существовать периоды плавки, когда процесс находится в смешанном режиме и лимитируется одновременно переносом кислорода и углерода [6 и др.], и, кроме того, как считают в [7, с. 271] «следует говорить лишь об отдаленной аналогии между лабораторными и заводскими плавками». Эта «сложность» в итоге привела к появлению, на основе экспериментальных данных, целого ряда критических и переходных точек на кинетической кривой обезуглероживания расплава в кислородном конвертере в завершающий период продувки, соответствующих комментариев при констатации фактов и механизмов, используемых иногда априори для объяснения этих (собственных экспериментальных) данных. При этом не учитывается главный компонент этих механизмов – гидрогазодинамика взаимодействия сверхзвуковых струй окислителя с газошлакометаллическим расплавом с учетом окислительно-восстановительных реакций, сопровождающих этот процесс. Первые попытки [3-5] количественного расчета «критической»

* ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Марциполь

концентрации, при всей их привлекательности, страдают следующими недостатками: представленная модель привязана к формальному разделению реакционной зоны на первичную и вторичную зоны, являющимся своего рода архаизмом; начало снижения скорости обезуглероживания в указанный период продувки плавки отождествляют со сменой лимитирующего звена с кислородного на углеродный, т.е. фактически с критической концентрацией по С.И. Филлипову; вторую критическую концентрацию - с процессом обезуглероживания за пределами реакционной зоны за счет использования кислорода, накопленного в металле и шлаке, что некорректно с точки зрения причинно-следственных связей; определение критических концентраций на кинетической кривой процесса обезуглероживания осуществляется только лишь по изменению содержания СО (или СО+СО₂) в конвертерных газах в процессе продувки по их газовому анализу; не учитывается, к тому же, влияние конструктивных особенностей используемых для дутья сопел наконечников фурм, степень их эрозионного износа, уровень шлака и др. на процесс обезуглероживания, в связи с очень ограниченными возможностями предлагаемой модели. Кроме того, в [3 и др.] по всей видимости, предполагают различные механизмы образования критической концентрации для различных условий (верхнего, донного) ввода окислителя в ванну. При этом математическая модель обезуглероживания расплава, приведенная в [3 и др.], а также представленный материал в [3], являющийся некоторым их, по сути, повторением, представляет собой некоторым образом известное приближение «фронта пламени». Можно показать, что если смесь потока окислителя и углерода расплава находится в стехиометрическом соотношении, то скорость обезуглероживания (окисления) максимальна, снижение скорости обезуглероживания связано с недостатком, либо окислителя, либо топлива (углерода). До фронта – недостаток топлива (углерода), после фронта – недостаток окислителя. При гипотетически возможном использовании в [3] соответствующего подхода, основанном на действительно физической сущности протекающих явлений при изучении процесса взаимодействия кислородного потока с расплавом, картина изменения скорости обезуглероживания в заключительный период продувки могла быть представлена более полно. При этом в расчетной модели для расчета критической концентрации следовало использовать не интегральную присоединенную массу расплава к потоку окислителя, а концентрации компонентов вдоль потока и в поперечном сечении кислородной струи. Последние величины можно достаточно просто оценить, даже используя интегральную присоединенную массу, рассчитанную в соответствии с данными [11-12]. К тому же в упомянутой модели для объяснения собственных экспериментальных данных по «первой» критической концентрации углерода (по версии [3] – $[\%C]_{кр}^{P3}$) при верхней продувке ванны кислородного конвертера принята величина интегральной присоединенной массы выше (примерно в 1,5÷2 раза) требуемой для получения этой критической концентрации ($[\%C]_{кр}^{P3} = 1\%$), что не корректно.

Таким образом, несмотря на достаточную освещенность затронутой темы в периодической печати и монографиях, ввиду отсутствия достаточно глубокой проработки газодинамических основ механизма взаимодействия кислородного дутья с расплавом, являющегося основным звеном конвертерных процессов, а также сложности экспериментального определения перечисленных характерных особенностей процесса обезуглероживания в заключительный период конвертерной плавки в связи с быстротечностью процесса, до настоящего времени существуют некоторые противоречия во мнениях по механизму образования критической концентрации углерода в расплаве кислородного конвертера, особенно для варианта верхней продувки, и некоторые аспекты проблемы требуют более тщательного изучения и уточнения. Кроме того, существующий подход к изучению процессов обезуглероживания в реакционной зоне (PЗ), разделяющий ее на две части, первичную (PPЗ) и вторичную (BPЗ), затрудняет анализ этой проблемы.

Цель статьи: устранить перечисленные противоречия, изучить и уточнить процесс обезуглероживания в рамках разработанной пространственной модели взаимодействия сверхзвуковых дутьевых струй с жидкой ванной кислородного конвертера с последующим его представлением в квазиодномерной постановке, наиболее доступной инженерам – металлургам и технологам.

Изложение основного материала. Для достижения цели была использована разработан-

ная математическая (гидрогазодинамическая) модель конвертерной плавки, в основу которой были заложены теория нерасчетных сверхзвуковых струй [13, 14], установленные на базе изучения аэроакустических характеристик сверхзвуковых струй связи их турбулентных характеристик (турбулентная вязкость и др.) с осредненными параметрами течения, а также разработанная теория реагирующих струй, истекающих в газовое пространство и тяжелую жидкость, позволившие получить распределения концентраций компонентов газшлакометаллического расплава в струе окислителя и их окисление (горение) с последующим восстановлением окислов железа. В частности, при изучении процесса обезуглероживания, учитывались расположение фурмы над расплавом, уровень шлака, угол наклона оси сопел к оси фурмы, степень использования кислорода дутья ванной, состав, температура и скорость встречных потоков конвертерных газов, динамика взаимодействующих фаз, содержание углерода в ванне, горение его в потоке кислорода при полученных (рассчитанных определенных) распределениях концентраций всех компонентов и примесей в потоке кислорода, одностадийность и (или) двухстадийность процесса образования продуктов горения (или восстановления) и др. При этом реакционная зона (РЗ) при верхней продувке разделялась не на первичную (ПРЗ) и вторичную (ВРЗ), как общепринято, а на участки прямой («падающей») струи и отраженной. В расчетах принято также, что процесс горения лимитируется смешением горючего (расплав) и окислителя, скорости всех химических реакций бесконечно велики и, следовательно, состав и температура в таком диффузионном пламени термодинамически равновесны, т.е. реакции протекают настолько быстро, что в потоке не могут одновременно существовать топливо и окислитель. Такое приближение дает возможность использовать наглядные простые соотношения для анализа процесса горения (или восстановления) различных компонентов расплава (примесей), и в первую очередь интересующего углерода в потоке кислорода.

В процессе численного эксперимента получено, что длина факела взаимодействия потока окислителя с расплавом, представленная как расстояние от поверхности металла до стехиометрической поверхности фронта пламени (обезуглероживания) вдоль оси течения, растет с уменьшением содержания углерода в ванне. При этом на передней стенке фронта обезуглероживания (с некоторым приближением можно принять его как поверхность разрыва параметров) поток состоит в основном из окислителя и продуктов горения (окисления), на задней стенке – продукты горения (окисления) и расплав (шлак, конвертерный газ и др. и продукты восстановления (железо)). При верхней продувке этот фронт обезуглероживания по мере уменьшения содержания углерода в ванне расширяется в радиальном направлении и перемещается вдоль оси потока кислорода, достигая сначала дна кратера заглубления струи в «падающем» потоке, затем поверхность металлической ванны в «отраженном» потоке. Эти две характерные особенности (условно назовем их «критическими») представляют особый интерес при малых углах наклона сопел к оси фурмы, обычно используемых в практике кислородного конвертирования. Первая - связана с моментом достижения стехиометрической поверхностью горения (обезуглероживания) дна кратера на оси течения, после которой из зоны горения, где существует избыточный кислород и продукты окисления (сгорания), кислород и окислы (в основном окислы железа) жидкостным потоком начинают транспортироваться (попадать) в нижние слои под кратером. Кислород попадает в нижние слои ванны под кратером только вследствие переноса его потоком жидкости – в основном окислами (шлаком), что обусловлено наличием собственной динамики потока жидкости и подтверждается наличием так называемой «бороды» ниже кратера в модельном эксперименте. Эти окислы окутывают (частично или полностью) при их «всплывании» из-за различия их плотности от плотности расплава нисходящие и восходящие потоки окислителя. Эффект этого явления существенно зависит от глубины проникания газовой струи в расплав, скорости и расхода жидкой фазы, поступающей под кратер, температуры ванны и глубины конвертерной ванны, от которых, в свою очередь, зависит глубина проникания окислов железа в расплав и их рассредоточение. В этом случае процесс обезуглероживания в конвертерной ванне находится как бы в смешанном режиме, т.е. лимитируется как переносом кислорода, так и углерода к окислительной струе и скорость окисления снижается («смешанный» режим переноса), и не является критическим по определению [1, 2], в отличие от мнения [3] и совпадающий с мнением [6 и др.]. Такой режим продолжается до второй особенности в связи с продолжающимся поступлением в расплав окислов. Вторая особенность связана с перемещением вдоль оси восходящего потока окислителя стехиометрической поверхности (фрон-

та обезуглероживания) на поверхность металлического расплава в связи с продолжающимся уменьшением концентрации углерода в металле и является аналогом «критической» концентрации при донном подводе окислителя. С этого момента кислород и окислы из струи попадают в шлак и газовую фазу, снижая коэффициент использования кислорода ванной и увеличивая содержание CO_2 в конвертерных газах при их дожигании и перекипяя шлак при его наличии кислородом дутья. Последнее подтверждается литературными данными (см. например, [3, 6 и др.]) и непрерывным анализом состава конвертерных газов по ходу продувки [3]. При этом возможна также следующая (неверная) интерпретация факта увеличения содержания CO_2 в конвертерных газах: снижение скорости обезуглероживания приводит соответственно к снижению выхода CO . Другими словами, в этом случае, и только в этом, происходит смена лимитирующего звена процесса (с «кислородного» на «углеродное»), т.е. перенос лимитируется исключительно доставкой углерода к окислительной струе, а скорость окисления продолжает снижаться теперь из-за представленной причины, что полностью согласуется с теорией С.И. Филиппова [1, 2]. До тех пор, пока процесс не лимитируется представленным переносом, фронт пламени обезуглероживания движется вдоль (по направлению оси) газоструйного потока в толще металлического расплава. Вблизи этой точки 2 (критической концентрации по определению [1, 2]) по ходу продувки в зависимости от температуры и окисленности ванны (что отражается также на состоянии шлакометаллической эмульсии, а не наоборот как предполагают в [3]), зависящей от постоянного поступления окислов в ванну под кратером (согласно первой характерной особенности – см. выше), происходит переход от «поверхностного» реагирования по всему фронту обезуглероживания в струе к объемному горению углерода («кипению», «самораскислению», обезуглероживанию), т.е. наблюдается тривиальный «переход» радиальной стехиометрической поверхности (фронта пламени) в ванну или стехиометрической поверхностью является вся ванна, что обуславливает третью особенность. Это приводит к «локальному» по времени продувки росту выхода конвертерных газов и некоторое снижение CO_2 в них, что отражает суммарную скорость окисления во всей ванне. Последнее обстоятельство может приводить, в зависимости от предшествующей этому моменту интенсивности дутья и соответственно оставшегося количества углерода в ванне, к интенсивному росту слоя (вспениванию) ванны и возможному выбросу металла и шлака из конвертера.

Существует мнение, что образование выбросов связано с неравномерным разогревом ванны, перегревом верхней части ванны по сравнению с нижней, предполагая наличие хорошо перемешиваемой верхней части ванны (ВЧВ) и плохо перемешиваемой нижней (НЧВ). Картина усугубляется возможным присутствием в ванне нерасплавленного лома и (или) заниженной температурой начала продувки. При этом процесс сопровождается сворачиванием шлака, приводящего к уносу металла. Обычно предпринимаемая операция для предотвращения выносов металла - наводка шлака путем поднятия фурмы, но поднятие фурмы еще больше увеличивает перегрев верхней части и следствием является выброс металла. Опускание же фурмы приводит к улучшению перемешивания, снижению температуры ванны и как следствие к снижению вероятности выбросов.

Однако с точки зрения гидрогазодинамики взаимодействующих фаз (горения и др.) и механики струйного перемешивания, особенно при достаточно больших глубинах заглублиения струи окислителя в расплав, разделение ванны на ВЧВ и НЧВ с большой степенью вероятности является очень сомнительным. Кроме того, подъем фурмы приводит в первую очередь к увеличению «первой» «критической» концентрации углерода в ванне и более раннему накоплению избыточного кислорода в ванне. В зависимости от уровня расположения фурмы и времени продувки с более раннего момента и при большей концентрации углерода в ванне начинают попадать окислы в нижнюю часть ванны, скорость обезуглероживания снижается при большем содержании углерода в ванне. Ускоряется образование второй «критической» концентрации с перекипением шлака и дожиганием (окислением) кислородом струи CO в шлаке, т.е. сокращается интервал времени между наступлением «первой» и «второй» особенностями («критическими» концентрациями) вплоть до нуля, быстрым накоплением кислорода в ванне и ускоряющимся процессом объемного обезуглероживания и выбросам. Чем выше расположена фурма над ванной, тем в конечном итоге интенсивнее выбросы. Снижение высоты фурмы над расплавом приводит к уменьшению количества переносимых в ванну окислов и кислорода под кратером, тем самым уменьшается как окисленность ванны, так и «критическая» концентрация, что

способствует снижению вероятности выбросов либо снижению их интенсивности из-за более низкого содержания углерода в ванне при достаточно низкой ее окисленности, что, в конечном итоге, улучшает еще качество металла. Увеличение интенсивности продувки для осуществления практически той же операции увеличения глубины внедрения струи в ванну, может привести к обратным эффектам, т.к. увеличивается количество кислорода, вносимого в ванну.

Временной интервал между характерными особенностями процесса обезуглероживания существенно зависят от интенсивности верхнего дутья, состава окислительного газа, глубины проникания кислородной струи в расплав, скорости поступления окислов и кислорода в ванну под кратером и др.

Использование математической модели плавки (и в связи с вышеизложенным) представленной в рамках одномерной постановки позволило установить величины характерных концентраций, которые составляют при любом вводе дутья в ванну

$$\left[\frac{\%C}{100} \right]_{\text{кр}} = K_{\text{стех}} \frac{2Sc \cdot c_{\text{O}_2}}{g_{\text{рас}}} = \frac{Sc \cdot k_{\text{стех}} c_{\text{O}_2}}{c \cdot (A \cdot \bar{H}_{\text{загл}}^{\text{рас}})} \sqrt{\frac{\rho_{\text{рас}}}{\rho_{\text{ex}}}} \sim \frac{c_{\text{O}_2}}{\bar{H}_{\text{загл}}^{\text{рас}}} \sim \left(\frac{z}{V_{\text{O}_2} \cdot w_{\text{ex}}} \right)^{\frac{1}{3}} \sim \left(\frac{G_{\text{сад}} \cdot z}{i_{\text{O}_2} \cdot w_{\text{ex}}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

$$\bar{H}_{\text{загл}}^{\text{рас}} = \left(\frac{w_{\text{ex}}^2 \rho_{\text{ex}} \cos^2 \alpha_{\text{н}}}{2c^2 \cdot \rho_{\text{рас}} g d_{\text{ex}} \left(1 + \frac{\bar{H}_{\text{ф}}}{\bar{H}_{\text{загл}}^{\text{рас}}} \right)^2} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{2 \cdot I \cdot \cos^2 \alpha_{\text{н}}}{\pi c^2 \cdot \rho_{\text{рас}} g d_{\text{ex}}^3 \left(1 + \frac{\bar{H}_{\text{ф}}}{\bar{H}_{\text{загл}}^{\text{рас}}} \right)^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

При углах наклона оси сопел к оси фурмы (или днища конвертера), используемых на практике, величина $\cos \alpha_{\text{н}} \approx 1$, тогда при $\bar{H}_{\text{ф}} \approx 0$

$$\left[\frac{\%C}{100} \right]_{\text{кр}} = \frac{Sc \cdot k_{\text{стех}} c_{\text{O}_2}}{A} \left(\frac{\rho_{\text{рас}} g d_{\text{ex}}^3}{0,625 \cdot c \cdot m_{\text{ex}} w_{\text{ex}}} \right)^{\frac{1}{3}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{ex}}}{\rho_{\text{рас}}}} = 2,7 \cdot \frac{Sc \cdot k_{\text{стех}} c_{\text{O}_2}}{A} \left(\frac{w_{\text{кр}}^{\text{ex}} L_{\text{зв}}}{w_{\text{ex}}^3} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho_{\text{ex}}}{\rho_{\text{рас}}} \right)^{\frac{1}{6}}, \quad (2)$$

- где $k_{\text{стех}}$ – стехиометрический коэффициент реакции окисления углерода;
 Sc – (диффузионное) число Шмидта;
 c_{O_2} – концентрация кислорода в потоке окислителя;
 $g_{\text{рас}}$ – относительная присоединенная масса расплава (жидкости) к струе окислителя в характерных точках кривой обезуглероживания;
 c – постоянная смешения сверхзвуковой струи окислителя с окружающей средой (показатель турбулентной вязкости);
 V_{O_2} – объемный расход дутья (при нормальных условиях);
 z – число сопел в наконечнике фурмы;
 $w_{\text{ex}}, \rho_{\text{ex}}$ – соответственно скорость и плотность окислителя в изобарическом сечении струи [13, 14];
 i_{O_2} – интенсивность дутья, $\text{м}^3/(\text{мин} \cdot \text{т})$;
 $G_{\text{сад}}$ – масса садки конвертера;
 g – ускорение свободного падения;
 d_{ex} – диаметр изобарического сечения [13, 14];
 I – импульс струи окислителя;
 $L_{\text{зв}}$ – длина сверхзвукового ядра в свободном потоке окислителя;
 $\bar{H}_{\text{ф}}$ – относительная высота расположения фурмы над металлическим расплавом в калибрах изобарического сечения;
 $A = 1$ и $A \approx 2$ соответственно при определении первой и второй («критической») концентрации по определению [1, 2]) особенности.

Здесь коэффициент A отражает относительную длину факела взаимодействия (длину, от-

несенную к глубине внедрения $H_{\text{загл}}^{\text{рас}}$ окислительной струи в расплав) для первой и второй особенностей, $\bar{H}_{\text{загл}}^{\text{рас}}$ – относительная величина заглубления струи в металлический расплав без учета слоя шлака, температура расплава 1600°C.

С ростом угла наклона оси сопел к вертикальной оси фурмы, происходит плавный переход от особенностей при верхней продувке к особенностям боковой и донной.

Для определения значения критической концентрации углерода при донной продувке расплава в выражениях (1) или (2) вместо величины $H_{\text{загл}}^{\text{рас}}$ необходимо использовать значение глубины ванны $H_{\text{в}}$. При этом отсутствует первая особенность и $\bar{H}_{\text{ф}} = 0$, $A = 1$.

Таким образом, «критическая» концентрация как характерный показатель перемешивания обратно пропорциональна присоединенной «критической» массе металлического расплава, мощности истекающей струи и пропорциональна дальности струи (или обратно пропорциональна энергии турбулентности) и, при одинаковой интенсивности дутья, числу сопел в наконечнике фурм. В итоге «критическая» концентрация, согласно выражениям (1) и (2), пропорциональна расходу кислорода через сопло и слабо растет с ростом этого расхода.

Если представить конвертерную ванну как реактор идеального смешения, что особенно близко к реальной картине перемешивания расплава во второй половине продувки плавки, то время $\tau_{\text{кр}}$ достижения величины «критической» концентрации $C_{\text{кр}}$ составит от всего времени продувки $\tau_{\text{пр}}$

$$\bar{\tau}_{\text{кр}} = \frac{\tau_{\text{кр}}}{\tau_{\text{пр}}} = 1 - \frac{[\%C]_{\text{кр}}}{[\%C]_{\text{в}}^{\text{нач}} - [\%C]_{\text{к}}^{\text{нач}}} = 1 - \frac{270 \cdot \frac{1}{A} \cdot Sc \cdot \kappa_{\text{стех}} \cdot c_{\text{O}_2} \left[\frac{w_{\text{кр}}^{\text{ex}} L_{\text{зв}}}{w_{\text{ex}}^3} \left(1 + \frac{\bar{H}_{\text{ф}}}{\bar{H}_{\text{загл}}^{\text{рас}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho_{\text{ex}}}{\rho_{\text{рас}}} \right)^{\frac{1}{6}}}{[\%C]_{\text{в}}^{\text{нач}} - [\%C]_{\text{к}}^{\text{нач}}}. \quad (3)$$

Так, при использовании технически чистого кислорода со следующими параметрами дутья ванны LD – конвертера: число Маха сопел $M_a = 2,3$; полуугол раствора сопел $\gamma_a = 5^\circ$; диаметр выходного сечения $d_a = 0,062$ м; степень нерасчетности $n = 1$; высота фурмы над металлическим расплавом $H_{\text{ф}} = 1,2$ м; начальное содержание углерода в ванне $[\%C]_{\text{в}}^{\text{нач}} = 4\%$, величина переходной концентрации $[\%C]_{\text{кр}}^{\text{пер}} = 1,0\%$ (для этих условий) достигается при относительном времени продувки $\bar{\tau}_{\text{кр}} = 0,75$, величина «критической» концентрации без учета окисленности ванны $[\%C]_{\text{кр}}^{\text{O}_2}$ – при $\bar{\tau}_{\text{кр}}^{\text{O}_2} = 0,87$, что согласуется с литературными данными [3] по определению времени достижения «критической» концентрации углерода по ходу продувки. Расчетное время достижения последней характерной концентрации является обычно несколько завышенным по сравнению с реальным, так как в выражении (3) не учитывается достаточно высокая окисленность ванны в завершающей стадии продувки. При относительно аномальных ходах плавков при малых значениях глубины внедрения струи в расплав величина $[\%C]_{\text{кр}}^{\text{пер}}$, согласно (1), растет, и время достижения этой концентрации по (3) снижается. Например, при снижении глубины внедрения кислородной струи на 20% в условиях приведенного выше примера ($H_{\text{загл}}^{\text{рас}} \cong 1,2$ м), относительное время продувки $\bar{\tau}_{\text{кр}}$, при котором достигается $[\%C]_{\text{кр}}^{\text{пер}}$, составит уже 0,68.

Представленная простейшая математическая модель реакционной зоны при верхней продувке – это не столько математическая теория, сколько иллюстрации, цель которых – простейшими математическими средствами описать те физические модели явлений, которые автор сформулировал на основе детального изучения посредством анализа и эксперимента процесс взаимодействия окислительных сверхзвуковых струй с жидким расплавом.

Разработанная модель позволяет анализировать основные стадии обезуглероживания в конвертерной плавке, определять пути к рациональному дутьевому режиму, при использовании для наконечников фурм дутьевых сопел любой конфигурации, в т.ч. с наложением на поток окислителя пульсаций определенной частоты.

Выводы

1. Уточнен физический смысл «критической» концентрации углерода, подтверждена и уточнена теория С.И. Филиппова применительно к конвертерным процессам, устранены некоторые противоречия в существующих мнениях по механизму образования и в трактовке характерных критических точек на кривой обезуглероживания, уточнен механизм выбросов металла и шлака в заключительный период продувки. Так, движение фронта обезуглероживания вдоль зоны взаимодействия струи с металлическим расплавом с учетом характерных особенностей гидрогазодинамики взаимодействия при снижении концентрации углерода в нем обуславливает появление характерных («критических») особенностей в процессе обезуглероживания расплава.
2. Полученные зависимости «критических» концентраций от различных факторов: параметров истечения, свойств газовой и жидкой фазы, параметров шлакового режима плавки, режимных параметров и геометрии дутьевых устройств и др., могут использоваться для выбора конструктивных особенностей сопел в дутьевых устройствах и оптимизации соответствующих дутьевых режимов.
3. При дальнейших исследованиях в рассматриваемом направлении целесообразным является дополнительный учет теплового режима работы конвертера, скорости химических реакций, динамики и состава жидкостного потока окислов под кратером проникания струи окислителя в расплав и в отраженной струе, тепло- и массообмена в этой области, что позволит получить более полную картину накопления окислов в ванне и разработать более эффективные мероприятия по снижению ее окисленности и возможных выбросов металла и шлака из горловины кислородных конвертеров.

Список использованных источников:

1. Филиппов С.И. Теория металлургических процессов / С.И. Филиппов. – М. : Металлургия, 1967. – 279 с.
2. Филиппов С.И. Теория критических концентраций / С.И. Филиппов // Физико-химические основы процессов производства стали. – М. : Наука, 1979. – С. 79-87.
3. Сущенко А.В. Совершенствование дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров на основе исследования процессов в реакционной зоне : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.16.02 / А.В. Сущенко; Приаз. гос. техн. ун-т. – Мариуполь, 2002. – 202 с.
4. Капустин Е.А. Расчет критической концентрации углерода в кислородном конвертере с донной продувкой / Е.А. Капустин, А.В. Сущенко // Известия вузов. Черная металлургия. – 1986. – № 5. – С. 145-146.
5. Капустин Е.А. Критическая концентрация углерода и анализ процесса обезуглероживания в сталеплавильных агрегатах / Е.А. Капустин, А.В. Сущенко // Известия вузов. Черная металлургия. – 1988. – №9. – С. 40-44.
6. Лузгин В.П. Газы в стали и качество металла / В.П. Лузгин, В.И. Явойский. – М. : Металлургия, 1983. – 232 с.
7. Явойский В.И. Теория процессов производства стали / В.И. Явойский. – М. : Металлургия, 1967. – 792 с.
8. Семенов Н.П. Некоторые вопросы обезуглероживания расплавов Fe-C / Н.П. Семенов, В.И. Явойский, А.В. Гейнеман // Известия вузов. Черная металлургия. – 1972. – № 3. – С. 46-49.
9. Арсентьев П.П. Конвертерный процесс с комбинированным дутьем / П.П. Арсентьев, В.В. Яковлев, С.В. Комаров. – М. : Металлургия, 1991. – 176 с.
10. Баптизманский В.И. Конвертерные процессы производства стали. Теория, технология, конструкция агрегатов / В.И. Баптизманский, М.Я. Меджибожский, В.Б. Охотский. – Киев, Донецк : Вища школа, 1984. – 343 с.
11. Капустин Е.А. О газовой струе, истекающей в жидкость / Е.А. Капустин, В.Е. Давидсон, В.Н. Евченко // Гидромеханика и теория упругости. – Днепропетровск : ДГУ, 1981. – Вып. 27. – С. 89-95.
12. Давидсон В.Е. Исследование эжекционных свойств дутьевых струй / В.Е. Давидсон, В.Н. Евченко // Гидромеханика и теория упругости. – Днепропетровск : ДГУ, 1982. – Вып. 29. – С. 44-51.
13. Лухтура Ф.И. Одномерная теория сверхзвуковых нерасчетных струй газа / Ф.И. Лухтура // Изв. РАН. МЖГ. – 1993. – № 1. – С. 48-56.

Bibliography:

1. Filippov S.I. Theory of metallurgical processes / S.I. Filippov. – M. : Metallurgia, 1967. – 279 p.
2. Filippov S.I. Theory of critical concentrations / S.I. Filippov // Physical and chemical bases of processes of steelmaking. – M. : Nauka, 1979. – P. 79-87. (Rus.)
3. Sushchenko A.V. Perfection of the blast modes and devices of oxygen converters on the basis of research processes in a reactionary zone: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk : 05.16.02 / A.V. Sushchenko; Priaz. State Technical University. – Mariupol, 2002. – 202 p. (Rus.)
4. Kapustin E.A. Calculation of critical concentration of carbon in an oxygen converter with the ground blowing / E.A. Kapustin, A.V. Sushchenko // Izvestiya vuzov. Tshernaya metallurgia. – 1986. – № 5. – P. 145-146. (Rus.)
5. Kapustin E.A. Critical concentration of carbon and analysis of process of decarbonating in steel-smelting aggregates / E.A. Kapustin, A.V. Sushchenko // Izvestiya vuzov. Tshyornaya metallurgia. – 1988. – № 9. – P. 40-44. (Rus.)
6. Luzgin V.P. Gases in steel and quality of metal / V.P. Luzgin, V.I. Yavoyskii. – M. : Metallurgia, 1983. – 232 p. (Rus.)
7. Yavoyskii V.I. Theory of processes of steelmaking / V.I. Yavoyskii. – M. : Metallurgia, 1967. – 792 p. (Rus.)
8. Semyonov N.P. Some questions of decarbonating of fusions Fe-C / N.P. Semyonov, V.I. Yavoyskii, A.V. Geyneman // Izvestiya vuzov. Tshyornaya metallurgia. – 1972. – № 3. – P. 46-49. (Rus.)
9. Arsent'ev P.P. Converter process with the combined blowing / P.P. Arsent'ev, V.V. Yakovlev, S.V. Komarov. – M. : Metallurgia, 1991. – 176 p. (Rus.)
10. Babtizmanskii V.I. Converter processes of steelmaking. Theory, technology, construction of aggregates / V.I. Babtizmanskii, M.Ya. Medzhibozhskii, V.B. Ohotskii. – Kyiv, Donetsk : Vishcha shkola, 1984. – 343 p. (Rus.)
11. Kapustin E.A. About a gas jet outflowing in a liquid / E.A. Kapustin, V.E. Davidson, V.N. Yevchenko // Gidromekhanika i teoria uprugosti. – Dnepropetrovsk : DGU, 1981. – Vip. 27. – P. 89-95. (Rus.)
12. Davidson V.E. Research of ejection properties of blast streams / V.E. Davidson, V.N. Yevchenko // Gidromekhanika i teoria uprugosti. – Dnepropetrovsk : DGU, 1982. – Vip. 29. – S. 44-51. (Rus.)
13. Lukhtura F.I. One-dimensional theory of off-design supersonic gas jets / F.I. Lukhtura // Fluid Dynamics, 1993. – V. 28, № 1. – P. 35-40. (Rus.)

Рецензент: А.М. Скребцов
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 7.03.2012

УДК 669.046.46

©Петрищев А.С.¹, Григорьев С.М.²

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ,
СОСТАВА ШИХТЫ НА ПЛОТНОСТЬ МЕТАЛЛИЗОВАННОГО
ВАНАДИЙСОДЕРЖАЩЕГО МАТЕРИАЛА**

Исследованы фазовые и структурные превращения в процессе углеродотермического восстановления пентаоксида ванадия. Проведено изучение влияния некоторых технологических параметров процесса углеродотермического восстановления таблеток на основе оксида V_2O_5 на степень их разбухания, а также причин, вызывающих это явление, для целенаправленного регулирования его в промышленных условиях.

Ключевые слова: пентаоксид ванадия, углеродотермическое восстановление, фазовые превращения, структурные превращения, степень восстановления, разбухание.

¹ аспирант, ГВУЗ «Запорожский национальный технический университет», г. Запорожье

² д-р техн. наук, доцент, ГВУЗ «Запорожский национальный университет», г. Запорожье