

Содержание (Fe), % в шлаке при продувке металла (10^2 , С %) в подовых агрегатах

Завод	Содержание углерода, % • 10^2										
	< 5	5-6	6-7	7-8	8-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	> 60
Breckenridge	28	34	31	28	15	13	12	12	10	10	
Steubenville	34	31	28								
Br-1,2	30	21				12	12	11	8	9	12
МКЗ-1	18	13			9						
ДСПА без продувки ванны Ar	18	15			12						
Мартеновская печь с продувкой ванны А	10	8			6						
ДСПА с продувкой ванны Ar	14	11			8						

Библиографический список

1. Edwards R. E. // J. Metals. – 1950. – № 5. – P. 736-743.
2. Федорович В. Г., Пухнаревич Г. П., Семькин С. И. и др. // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 1981. – № 1. – С. 11-13.
3. Федорович В. Г., Лемпицкий В. В., Раскидкин А. Е. // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 1982. – № 4. – С. 14-16.
4. Шнееров Я. А., Носов К. Г., Борисов Ю. Н. и др. // Сталь. – 1986. – № 1. – С. 21-24.
5. Смоктий В. В. // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2012. – № 6. – С. 9-12.

6. Шибко А. В., Пишида В. Н., Онацкий С. М. // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2012. – № 6. – С. 7-9.

7. Mons R. F., Storza P. M. // Int.J.Heat&Mass Tansfer. – 1978. – № 4. – P. 371-384.

8. Охотский В. Б. // Модели металлургических систем. – Днепропетровск: Системные технологии, 2006. – 287 с.

9. Аксененко В. А., Ботвинский В. Я., Горлов Г. В. и др. // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2000. – № 2. – С. 9-10.

Поступила 25.03.2015



УДК 669.184.244.66

Наука

Чернятевич А. Г. /д. т. н./
ИЧМ НАНУ

Разработка дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки при верхней кислородной продувке. Сообщение 1

На основе результатов высокотемпературного моделирования и промышленных исследований представлены модель рафинирования конвертерной ванны при верхней кислородной продувке и методика расчета основных конструктивных параметров головок кислородных фурм. Выданы технологические рекомендации по дутьевому и шлаковому режимам ведения плавки. Ил. 4. Библиогр.: 16 назв.

Ключевые слова: высокотемпературное моделирование, конвертерная плавка, модель рафинирования, кислородная фурма, режим продувки

On the results of high-temperature modeling and industrial research a model of converter bath refining at the top oxygen blowing and the method of calculating of the basic design parameters of oxygen lance tips are presented. Technological guidelines as for the blowing and slag regimes of melting processes are given.

Keywords: high-temperature modeling, converter melting, a refining model, oxygen lance, blowing regime

Дутьевой и шлаковый режимы конвертерной плавки при верхней кислородной продувке в наилучшем технологическом варианте должны обеспечивать:

- ускоренное растворение присадок извести и магнезиальных флюсов с наведением с самого начала продувки жидкоподвижного основного окислительного шлака с надлежащей фосфор- и серопоглощительной способностью;

- спокойный без выбросов и выносов характер продувки конвертерной ванны в режиме «заглубленных» кислородных струй при расположении уровня вспененного шлака выше среза головки фурмы на протяжении преобладающей части времени операции.

Надлежащее выполнение этих условий определяется:

- конструкцией головки верхней кислородной фурмы;

- минутным расходом кислорода (Q_{O_2}) по ходу продувки конвертерной ванны;

- начальной ($H_{\phi}^{нач}$) и рабочей ($H_{\phi}^{раб}$) высотами расположения фурмы над уровнем ванны в спокойном состоянии;

- количеством и порядком завалки в конвертер шихтовых материалов, шлакообразующих и теплоносителей до и по ходу продувки.

Обоснованный подход к выбору конструкции головки кислородной фурмы, установлению рационального дутьевого и шлакового режимов ведения конвертерной плавки, обеспечивающих улучшение шлакообразования и рафинирования расплава, снижение потерь металла с выбросами, выносами, в виде пыли (бурого дыма) и оксидов железа в шлаке, немислим без наличия достоверной информации относительно:

- гидрогазодинамических режимов взаимодействия кислородных струй с конвертерной ванной, макроструктуры и размеров образующихся при этом реакционных зон;

- особенностей рафинирования и состояния конвертерной ванны в ходе продувки.

Автором, на основе результатов высокотемпературного моделирования [1-13] и промышлен-

ных исследований [14, 15], развитие гидрогазодинамических и тепломассообменных процессов в рабочем пространстве конвертера в ходе верхней кислородной продувки ванны представляется следующим образом.

С началом продувки с принятым расходом кислорода (Q_{O_2}) через обычную многосоловую фурму, снабженную головкой с круговым расположением 4-6 сопел Лавалья под углом $\alpha = 15-20^\circ$ к вертикали, по мере опускания последней происходит «зажигание» плавки при выполнении граничного условия перехода от режима продувки с образованием подвижных открытых кратеров к «зажиганию» плавки [1, 2]

$$H_{\phi} / d_{\text{вых}} = \left(\sum i_{O_2} / mg \right)^{0,164}, \quad (1)$$

где H_{ϕ} - высота фурмы над уровнем спокойной ванны, м; $d_{\text{вых}}$ - выходной диаметр сопла Лавалья, м; $\sum i_{O_2}$ - суммарный импульс кислородных струй, воздействующих на ванну, Н; m - масса жидкого металла, кг; g - гравитационное ускорение.

После «зажигания» плавки кислородная фурма, как правило, ступенчато опускается и фиксируется на начальной высоте $H_{\phi}^{нач}$, определяемой из соотношения [2]

$$H_{\phi}^{\text{нач}} / d_{\text{вых}} = 63,1 \left(\sum i_{O_2} / mg \right)^{0,094}. \quad (2)$$

На протяжении начального периода продувки, занимающего до 15-20 % времени операции при неизменных значениях (Q_{O_2}) и $H_{\phi}^{нач}$ осуществляется, при достаточно глубоком проникновении кислородных струй в расплав и рассредоточенной порционной присадке требуемого количества шлакообразующих материалов (известь, доломит, плавленый шпат), наводка основного окисленного жидкоподвижного шлака (рис. 1).

Ускорению процесса шлакообразования способствует увеличение числа сопел Лавалья в го-

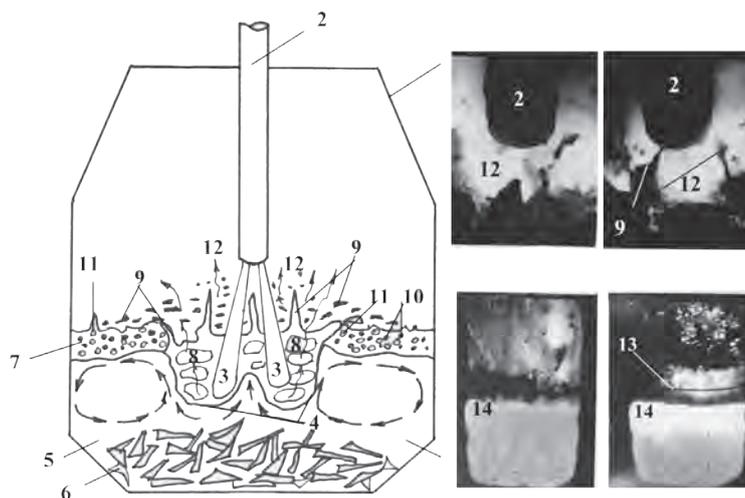


Рис. 1. Структура конвертерной ванны (а), картина продувки (б, в) и перегрева верхних горизонтов металлического расплава (г, д)

в начальный период плавки:

- 1 - конвертер; 2 - кислородная фурма;
- 3 - первичная реакционная зона ($I_{\text{р.з}}$);
- 4 - вторичная реакционная зона ($II_{\text{р.з}}$);
- 5 - металлическая ванна; 6 - металлический лом; 7 - вспененная шлакометаллическая эмульсия; 8 - макропузыри СО; 9 - всплески металла; 10 - капли металла; 11 - пузырьки СО; 12 - выход СО и бурого дыма;
- 13 - первоначальный уровень металлической ванны; 14 - зона перегрева металлического расплава

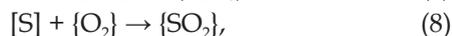
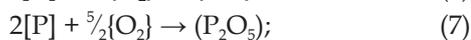
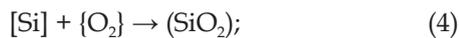
ловке фурмы, благодаря возрастанию реакционной поверхности взаимодействия кислородных струй с конвертерной ванной, характеризующейся высокой температурой и наличием оксидов железа.

Наводка шлака сопровождается интенсивным брызговыносом объемов металла из пределов реакционной зоны в результате непосредственного воздействия кислородных струй и выходящих из отдельных реакционных зон макропузырей СО на металлическую ванну. Разрушение макропузырей СО на поверхности расплава сопровождается возникновением всплесков и брызг металла, поднимающихся на высоту меньше $H_{\phi}^{нач}$ и направленных в сторону от фурмы с дальнейшим падением на поверхность образующейся шлакометаллической эмульсии (рис. 1). Количество и размер вовлеченных в шлак капель металла (корольков) за время продувки является существенным фактором, влияющим на ход рафинирования и поведение конвертерной ванны.

Уже в начальный период продувки формируется специфическая реакционная зона воздействия кислородных струй на конвертерную ванну, состоящая из первичной ($I_{п.з.}$) и вторичной ($II_{п.з.}$) реакционных зон [3, 4]. Согласно развиваемым положениям [5] в пределах первичной реакционной зоны, в результате тотального сжигания вовлеченных в кислородные струи объемов чугуна, получает преимущественное развитие процесс окисления железа

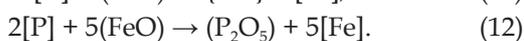
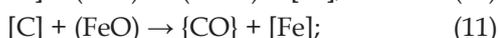
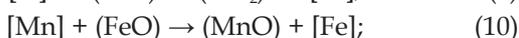
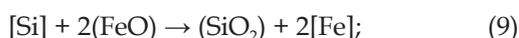


Одновременное удаление кремния, марганца, углерода, фосфора и серы осуществляется по реакциям:



в существенно меньшем количестве, соответствующем соотношению атомных долей железа и примесей в расплаве.

Преимущественно образующиеся в $I_{п.з.}$ оксиды железа поступают во вторичную реакционную зону ($II_{п.з.}$), где реагируют непосредственно с примесями металла:



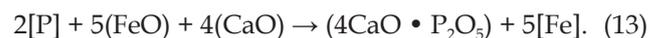
В начальный период продувки во вторичной реакционной зоне ($II_{п.з.}$) в соответствии с термо-

динамической активностью развивается окисление кремния и марганца и продукты реакций в виде железомарганцовистых силикатов и неиспользованной части оксидов железа всплывают на поверхность ванны, оттесняются потоком СО к стенкам конвертера и вступают во взаимодействие с присадками кусковой извести, обожженного доломита, добавляемого при необходимости плавикового шпата. В результате добавок указанных материалов и дальнейшего поступления в шлак продуктов окисления шлакообразующих примесей и железа чугуна количество шлака увеличивается с постепенным приближением к внешней границе реакционной зоны, а затем с полным покрытием поверхности ванны (рис. 1). Раннее формирование жидкого шлака способствует образованию защитного шлакового слоя на поверхности фурмы, препятствуя тем самым нарастанию металлической настывки на ней.

Наблюдаемое возрастание запыленности отходящих из конвертера газов на протяжении начального периода плавки [6] обусловлено постепенной интенсификацией обезуглероживания в реакционной зоне, а следовательно, улучшением условий дымообразования по мере окисления кремния, марганца и повышения температуры расплава, а также слабым фильтрующим воздействием на выходящий поток запыленных газов слоя вспененной шлакометаллической эмульсии, который располагается значительно ниже торца головки.

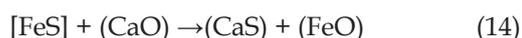
В пределах реакционной зоны воздействия кислородных струй на ванну обеспечивается преимущественное (до 90 % от общего количества) удаление кремния, марганца и углерода [7-9] и лишь частичное (до 15-20 %) окисление серы с удалением в газовую фазу по реакции (8).

Ускоренное удаление фосфора при высоком содержании углерода в ванне достигается только при быстрой наводке высокоосновного жидкоподвижного окислительного шлака, на границе которого с металлом (в объеме вспененной шлакометаллической эмульсии) развивается реакция дефосфорации [8]



Во время продувки поток всплесков и крупных брызг металла направляется из пределов вторичной реакционной зоны в шлак, а образовавшиеся в результате дробления в эмульсии шлака и металла корольки подвергаются дальнейшей дефосфорации и через определенное время снова попадают в основную металлическую ванну, вызывая снижение содержания фосфора в ней благодаря перемешиванию.

Значимое удаление серы из металла в шлак по реакции



начинается только при основности шлака $\text{CaO}/\text{SiO}_2 > 2$, когда в нем образуется двухкальциевый силикат и появляются свободные анионы кислорода (O^{2-}) в результате диссоциации основных оксидов CaO , MnO , MgO , FeO .

Развивающееся обезуглероживание корольков вызывает вспенивание образующейся шлакометаллической эмульсии преимущественно за счет газовыделения в объеме последней, так как основной поток CO выходит из пределов реакционной зоны. При этом высота вспененного эмульсионного слоя постепенно повышается, в то время как уровень металлической ванны несколько снижается (рис. 1) в результате окисления примесей расплава и части железа, а также вовлечения значительного количества металла в шлак [10, 11].

Преобладающее выделение теплоты в пределах реакционной зоны сопровождается тем, что перегретые и лишённые части примесей объемы металла из пределов вторичной реакционной зоны распространяются в отдаленные участки ванны. При этом создается направленная циркуляция перегретых потоков металла (рис. 1), поднимающихся вверх в пределах вторичных реакционных зон и затем расходящихся радиально в стороны у поверхности и опускающихся вдоль стен конвертера [4, 12]. Наиболее интенсивная циркуляция перегретых потоков металла происходит в пределах высоты ванны, соответствующей глубине распространения вторичных реакционных зон. Зона перегрева расплава постепенно расширяется по направлению к днищу с понижением высоты фурмы над уровнем металлической ванны.

Приближение уровня вспененной шлакометаллической эмульсии к горловине конвертера обычно происходит с завершением полного окисления кремния, большей части марганца и началом развития интенсивного обезуглероживания ванны при повышении ее температуры до 1400-1490 °С.

Дальнейшее опускание фурмы в основной период плавки на рабочую высоту, определяемую в соответствии с выражением [2]

$$H_{\text{ф}}^{\text{раб}} / d_{\text{вых.}} = 37,2 \left(\sum i_{\text{O}_2} / mg \right)^{0,092}, \quad (15)$$

обеспечивает более глубокое проникновение кислородных струй в металлическую ванну, формирование вторичной реакционной зоны с преимущественным расходом в ней оксидов железа на удаление углерода.

В этот период плавки (рис. 2) необходимо обеспечить продувку в режиме «заглубленных» струй с фиксацией уровня вспененной шлакометаллической эмульсии выше среза головки фурмы без возникновения выбросов, что достигается таким управляющим воздействием как периодическое изменение высоты фурмы относительно рабочего положения.

Интенсивное обезуглероживание ванны сопровождается [13] активной пульсацией струйных участков первичных реакционных зон (с периодичностью 0,10-0,15 с), изменением в ходе продувки угла раскрытия (в пределах 12-23°) и размеров струйного участка первичной реакционной зоны, увеличением размеров и выделением на поверхность ванны газовых макрообъемов со значительной интенсификацией всплескообразования и попаданием крупных всплесков на ствол фурмы, направленным брызгоуносом мелких капель металла вдоль ствола кислородной фурмы с частичным выносом за пределы горловины конвертера (рис. 2).

Если при расположении уровня вспененной шлакометаллической эмульсии ниже торца головки фурмы, зафиксированной на начальной высоте (рис. 1), в основном происходит объединение выходящих из отдельных реакционных зон потоков монооксида углерода, то с момента перекрытия вспененным шлаком торца головки выход макропузырей CO , формируемых в каждой из реакционных зон, на поверхность ванны происходит прерывисто (рис. 2). При этом вспененный слой шлакометаллической эмульсии, перекрывающий реакционную зону взаимодействия кислородных струй с металлическим расплавом, препятствует выносу капель металла на ствол фурмы, удерживая их тем сильнее, чем значительнее толщина слоя шлака и выше окисленность последнего.

Интенсивное образование вспененной шлакометаллической эмульсии, заполняющей свободный объем конвертера с приближением к срезу горловины, ведет к созданию ощутимых затруднений в выходе газов из реакционной зоны. В этих условиях выход газов на поверхность ванны приобретает взрывной характер (рис. 3), когда за незначительным по времени периодом накопления газов в околофурменной зоне следует энергичный прорыв окружающей оболочки эмульсии, сопровождающийся выбросами из конвертера или переливом через горловину шлакометаллической взвеси. Вывести процесс из этого состояния удастся, прежде всего, плавным увеличением «жесткости» дутьевого режима [11], т. е. снижением высоты фурмы над уровнем ванны или увеличением интенсивности продувки.

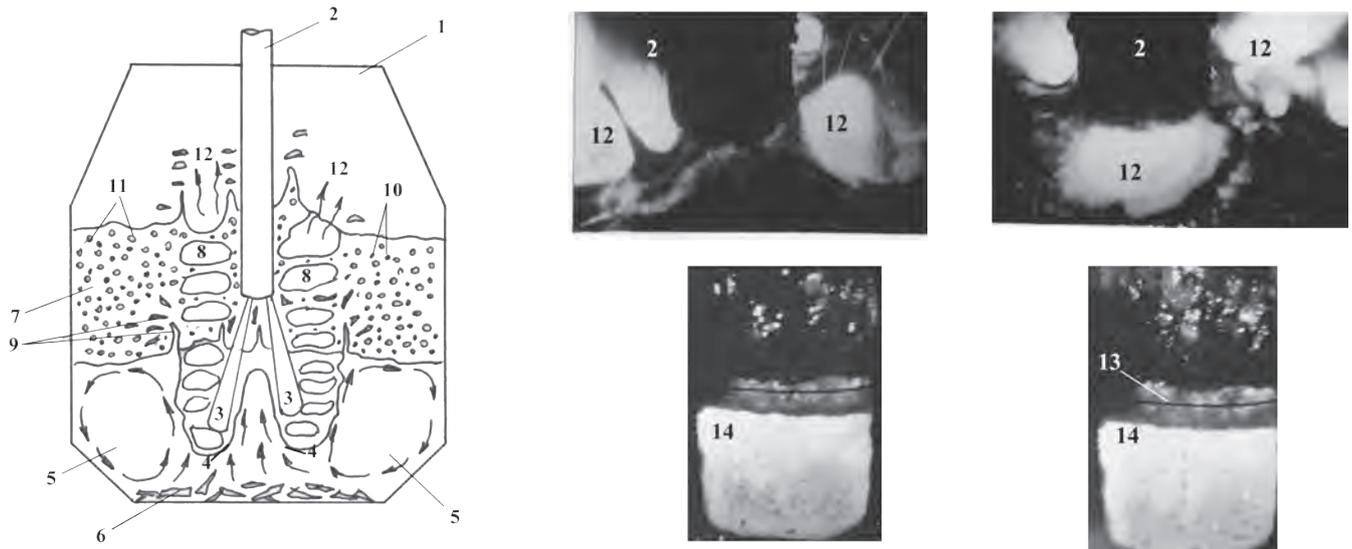


Рис. 2. Структура конвертерной ванны (а), картина продувки (б, в) и перегрева металлического расплава (г, д) в основной период продувки:

1 – конвертер; 2 – кислородная фурма; 3 – первичная реакционная зона ($I_{p.z.}$); 4 – вторичная реакционная зона ($II_{p.z.}$); 5 – металлическая ванна; 6 – металлический лом; 7 – вспененная шлакометаллическая эмульсия; 8 – макропузыри CO; 9 – всплески металла; 10 – капли металла; 11 – пузырьки CO; 12 – выход CO и бурого дыма; 13 – первоначальный уровень металлической ванны; 14 – зона перегрева металлического расплава

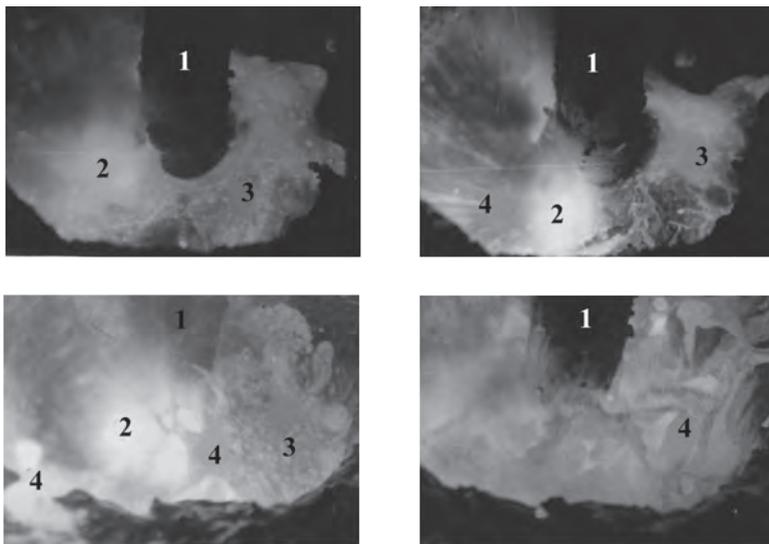


Рис. 3. Картина образования выбросов в ходе продувки конвертерной ванны:
1 – кислородная фурма; 2 – выход CO на поверхность ванны; 3 – поверхность шлака; 4 – выбросы шлакометаллической эмульсии

Это мероприятие, с одной стороны, интенсифицирует процесс обезуглероживания в пределах реакционной зоны и стабилизирует тем самым поток выходящих из нее газов. С другой стороны, уменьшается поступление оксидов железа в шлак, что ведет, наряду с действием осаживающих шлак добавок извести и известняка, к снижению высоты слоя шлакометаллической эмульсии из-за ослабления газовыделения в объеме шлака при обезуглероживании корольков.

На протяжении основного периода продувки до так называемых «переходных» концентраций углерода (0,9-1,2 %) реакция обезуглероживания преимущественно протекает в реакцион-

ной зоне и на нее расходуется практически весь вдуваемый через фурму кислород [5, 7, 10]. Помимо этого при обезуглероживании корольков металла в шлаке дополнительно участвует кислород оксидов железа и марганца. Обеднение шлака оксидами железа и марганца в период интенсивного обезуглероживания при горячей идущей плавке развивается так интенсивно, что шлак вообще теряет способность к вспениванию, сворачивается и раздувается к стенкам агрегата, выходящим из реакционной зоны потоком монооксида углерода. Это сопровождается интенсивным выносом мелких капель металла из пределов реакционной зоны, развитием

интенсивного заматливания ствола кислородной фурмы, горловины конвертера и камина газоотводящего тракта.

Сворачивание шлака предотвращается кратковременным переходом к «мягкому» дутью посредством подъема фурмы на уровень начальной высоты $H_{\phi}^{нач}$ или добавкой плавикового шпата. Эти технологические приемы способствуют усиленному притоку оксидов железа в шлак, разжижению последнего, ускорению процесса обезуглероживания корольков металла, и в результате усиленного газовыделения в объеме шлака возобновляется его вспенивание.

Пока обезуглероживание ванны протекает в основном в пределах реакционной зоны, что характерно для «переходных» значений концентрации углерода в расплаве, запыленность отходящих газов определяется высотой образующегося слоя вспененной шлакометаллической эмульсии, выполняющей, как уже упоминалось, роль своеобразного фильтра, улавливающего пыль.

С понижением концентрации углерода ниже «переходных» значений подвод кислорода превышает подвод углерода на обезуглероживание в реакционной зоне. Окисление углерода в реакционной зоне постепенно ослабевает и начинает интенсифицироваться процесс обезуглероживания в объеме металлической ванны на всплывающих пузырьках СО и в местах их зарождения за счет кислорода, поступающего из зоны продувки [5, 7]. В заключительный период продувки с понижением содержания углерода в ванне ниже 0,08-0,15 % скорость обезуглероживания уменьшается пропорционально снижению концентрации углерода в расплаве до 0,03-0,04 %, избыток кислорода в виде оксидов железа поступает в шлак, что вызывает потери выхода жидкого железуглеродистого полупродукта, увеличивает скорость износа футеровки

конвертера, но одновременно интенсифицирует процесс дефосфорации.

Обработкой материалов высокотемпературных экспериментов [1, 2, 4, 13] получены выражения (16-24) для определения основных размеров структурных составляющих первичной и вторичной пульсирующих реакционных зон, а также общего максимального диаметра реакционной зоны (рис. 4), которые легли в основу проектирования многосопловых головок кислородных фурм при круговом расположении сопел Лаваля под углом α к вертикали:

$$L_{I\min}(H_{\phi} + L_{I\min})^2 = 75,1 \frac{i_{O_2}}{\rho_{mg} \cos \alpha}; \quad (16)$$

$$L_{I\max}(H_{\phi} + L_{I\max})^2 = 133,3 \frac{i_{O_2}}{\rho_{mg} \cos \alpha}; \quad (17)$$

$$L_{II\min}(H_{\phi} + L_{II\min})^2 = 205,3 \frac{i_{O_2}}{\rho_{mg} \cos \alpha}; \quad (18)$$

$$L_{II\max}(H_{\phi} + L_{II\max})^2 = 228,6 \frac{i_{O_2}}{\rho_{mg} \cos \alpha}; \quad (19)$$

$$D_{I\min} = 2,68 \sqrt{\frac{i_{O_2}}{\rho_{mg} L_{I\max}}}; \quad (20)$$

$$D_{I\max} = 3,09 \sqrt{\frac{i_{O_2}}{\rho_{mg} L_{I\min}}}; \quad (21)$$

$$D_{II\min} = 5,02 \sqrt{\frac{i_{O_2}}{\rho_{mg} L_{II\max}}}; \quad (22)$$

$$D_{II\max} = 5,81 \sqrt{\frac{i_{O_2}}{\rho_{mg} L_{II\min}}}; \quad (23)$$

$$D_{общ} = 11,3H_{\phi} \left[\frac{i_{O_2}}{\rho_{mg} H_{\phi}^3} \right]^{0,65} (1 + L_{II\min} \operatorname{tg} \alpha) + d_0 + 2(H_{\phi} + L_{II\min}) \operatorname{tg} \alpha. \quad (24)$$



а)

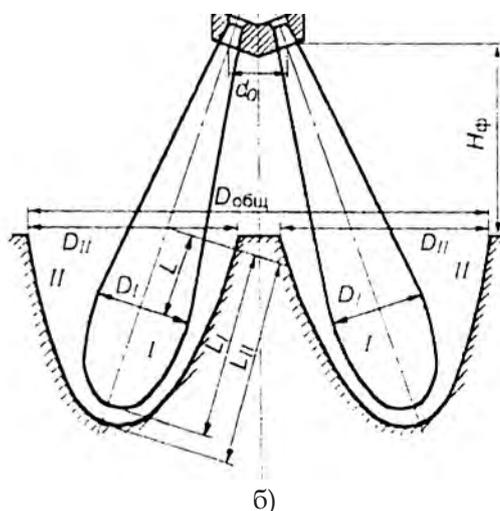


Рис. 4. Макрокартина (а) и схема (б) определяемых размеров первичной (I) и вторичной (II) реакционных зон при верхней моноструйной продувке

Здесь i_{O_2} – импульс одиночной кислородной струи, Н; ρ_m – плотность металла, кг/м³; d_0 – диаметр окружности расположения осей выходных сечений сопел Лавалья на торце головки, м.

Максимальное число n сопел Лавалья в головке фурмы определяется по формуле (25), выведенной из условий многоструйного дутья с минимальным выносом металла из конвертера [14]

$$n = \frac{Q_{O_2}}{(H^1 / 0,85)^{2,336}}, \quad (25)$$

в которой Q_{O_2} – расход кислорода, м³/мин; H^1 – высота рабочего пространства конвертера от уровня спокойной ванны, м.

Необходимое разведение реакционных зон интенсивного выхода монооксида углерода на поверхность ванны, с точки зрения более спокойного хода продувки, достигается предотвращением слияния в глубине расплава струйных участков первичных реакционных зон максимального диаметра $D_{I_{max}}$, что обеспечивается при выполнении соотношения

$$\tan \frac{\varphi}{2} = \frac{D_{I_{max}} - a}{2(H_{\Phi}^{раб} + L)}. \quad (26)$$

Здесь φ – угол в плане между осями соседних сопел, град; a – минимальное расстояние между осями сопел на торце головки, м; $L = 0,5 L_{I_{min}}$ – определяемая из уравнения (16) длина струйного участка первичной реакционной зоны, на котором струйный участок достигает максимального диаметра, м.

Угол наклона к вертикали α равномерно расположенных по кругу сопел Лавалья определяется из известного выражения

$$\sin \alpha = \frac{\sin(\varphi / 2)}{\sin(180^\circ / n)}. \quad (27)$$

Предложенная методика определения основных конструктивных параметров головок кислородных фурм, начальной и рабочей высот расположения фурм над ванной была использована при разработке и освоении дутьевых и шлаковых режимов плавки для 350 и 250-тонных конвертеров соответственно Западно-Сибирского металлургического завода (г. Новокузнецк, Россия) [15] и Днепровского металлургического комбината (г. Днепродзержинск, Украина) [16].

Выводы

На основе результатов высокотемпературного моделирования представлена модель рафинирования конвертерной ванны, отражающая физико-химические и гидрогазодинамические

особенности протекающих в рабочем пространстве конвертера процессов при верхней кислородной продувке. Предложена методика определения основных конструктивных параметров многосопловых головок кислородных фурм, начальной и рабочей высот расположения фурмы над ванной, которая использована для разработки дутьевого и шлакового режимов плавки в большегрузных конвертерах.

Библиографический список

1. Макрокартина физических явлений в реакционной зоне кислородного конвертера при продувке многосопловыми фурмами / А. Г. Чернятевич, Е. Я. Зарвин, Ю. Н. Борисов и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1977. – № 12. – С. 61-65.
2. Мокринский А. В., Протопопов Е. В., Чернятевич А. Г. Гидрогазодинамические режимы взаимодействия кислородных струй с конвертерной ванной // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2005. – № 4. – С. 11-17.
3. Охотский В. Б., Баптизманский В. И., Просвирин К. С., Щедрин Г. А. Строение реакционной зоны при продувке металла кислородом // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1973. – № 8. – С. 50-53.
4. Чернятевич А. Г., Зарвин Е. Я., Соломон Г. М. О структуре реакционной зоны при продувке металла кислородной и кислородно-порошковой струями. Сообщение 1 // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1978. – № 10. – С. 72-77.
5. Охотский В. Б., Чернятевич А. Г. Модель процесса рафинирования металла при продувке его кислородом сверху // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1972. – № 10. – С. 61-64.
6. Исследование динамики пылеобразования в кислородном конвертере / Ю. И. Шиш, А. Г. Чернятевич, Ю. А. Коржавин и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1991. – № 4. – С. 45-48.
7. Охотский В. Б., Чернятевич А. Г., Просвирин К. С. Зона преимущественного рафинирования металла при продувке ванны кислородом // Сталеплавильное производство (тематический отраслевой сборник № 3, МЧМ СССР). – М.: Металлургия, 1974. – С. 75-82.
8. Зарвин Е. Я., Чернятевич А. Г., Волович М. И. О месте преимущественного окисления шлакообразующих примесей при продувке металла кислородом // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1975. – № 2. – С. 22-27.

9. Чернятевич А. Г., Шишов Б. И., Соломон Г. М. Экспериментальная оценка окисления углерода в различных зонах кислородно-конвертерной ванны // *Металлургия и коксохимия. Респ. межв. науч.-техн. сб., Киев: Техніка.* – 1981. – Вып. 72. – С. 32-36.

10. Чернятевич А. Г., Зарвин Е. Я., Волович М. И. Наблюдение через прозрачную стенку за поведением конвертерной ванны при продувке // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – 1975. – № 2. – С. 37-42.

11. Чернятевич А. Г., Зарвин Е. Я., Борисов Ю. Н., Волович М. И. О механизме образования выбросов из кислородного конвертера с верхней продувкой // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – 1976. – № 10. – С. 54-59.

12. Протопопов Е. В., Чернятевич А. Г., Юдин С. В. Исследование химических и температурных градиентов в конвертерной ванне с использованием высокотемпературного моделирования // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – 1997. – № 10. – С. 20-24.

13. Чернятевич А. Г., Шишов Б. И. Некоторые вопросы распространения кислородных струй в рабочем пространстве конвертера. Сообщение 2 // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – 1981. – № 3. – С. 42-45.

14. Баптизманский В. И., Охотский В. Б. Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса. – Киев-Донецк: Вища школа, 1981. – 183 с.

15. Чернятевич А. Г., Борисов Ю. Н. Разработка дутьевого режима плавки для 350-т конвертеров ЗСМЗ // *Процессы выплавки стали в конвертерах и мартеновских печах. Тематический отраслевой сб., М: «Металлургия».* – 1982. – С. 9-14.

16. Разработка и совершенствование дутьевого режима плавки при переделе низкомарганцовистого чугуна в 250-т конвертерах / А. Г. Чернятевич, К. Г. Носов, Ю. Н. Борисов и др. // *Бюллетень НТИ «Черная металлургия».* – 1987. – Вып. 2. – С. 47-49.

Поступила 02.06.2015

