

УДК 669.184.14

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ В СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ВАННЕ КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТЕРА

*Хисамутдинов Н.Е., д.т.н., профессор (nehis@yandex.ru)
Явойская О.В.¹, к.х.н., доцент кафедры технологии металлов
и ремонта машин (metal-01ga@mail.ru)*

*Явойский А.В.², д.т.н., профессор кафедры металлургии стали, новых производственных
технологий и защиты металлов
Хисамутдинов С.Н.³, к.т.н.*

¹ Уральский государственный аграрный университет
(620075, Россия, Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, 42)

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

³ ООО «Сити Рапид»
(117335, Россия, Москва, ул. Архитектора Власова, 6)

Аннотация. Технология кислородно-конвертерного производства стали определяется процессами, протекающими в реакционной зоне конвертера, состоящей из «первичной» и «вторичной» зон. «Первичная» зона – это кратер, образовавшийся в результате соударения сверхзвуковой газовой струи с поверхностью расплавленного металла, заполненный каплями металла диаметром 0,1 – 2 мм. Окружающая ее «вторичная» зона состоит из расплава с огромным количеством газовых пузырьков диаметром 0,2 – 4 мм. Суммарная площадь поверхности капель и пузырьков на четыре порядка больше поверхности спокойного расплава, что говорит о важной роли, которую играют при производстве стали процессы, протекающие на межфазных границах. Структура реакционной зоны и распределение в ней температуры изучались методом «горячего» моделирования, когда расплавленный чугун продувался кислородом в прозрачном кварцевом тигле, через стенку которого проводилась фото- и киносъемка. Помимо распределения температуры, отснятые материалы позволили также изучить гидродинамику ванны непосредственно в зоне продувки. Самым неожиданным результатом «горячего» моделирования оказалось движение пузырьков во «вторичной» зоне. Они двигались по нормальям к поверхности кратера, т.е. почти горизонтально, вместо того, чтобы всплывать вертикально, как это было при «холодном» моделировании на воде. Это явление обусловлено неоднородностью поверхностного натяжения расплава, вследствие чего пузыри перемещались в направлении более высоких температур. В жидкости с градиентом температуры поверхностное натяжение перед и за пузырьком различны. Силы, сжимающие пузырек позади него больше, чем спереди, что «выталкивает» его в сторону уменьшения поверхностного натяжения. Неоднородность поверхностного натяжения обусловлена градиентом температуры (до 1200 °С в пределах «вторичной» зоны) и изменением концентрации компонентов расплава, в особенности кислорода. Поверхностное натяжение железоуглеродистых расплавов с увеличением температуры изменяется неоднозначно. С повышением температуры до 1550 °С поверхностное натяжение растет, но при достижении 1550 – 1600 °С происходит перегиб, после чего оно начинает уменьшаться. Чем ниже содержание углерода в расплаве, тем выше точка перегиба. Движение газовых пузырей и инородных фаз в сторону уменьшения поверхностного натяжения начинается от изотермы 1550 °С, которая, таким образом, является внешней границей «вторичной» зоны, отделяющей ее от остальной ванны. Внутри нее результирующий вектор поверхностных сил толкает газовые пузырьки и частицы шлака вместе с массой расплавленного металла двигаться с ускорением горизонтально в сторону кратера. Это явление определяет всю гидродинамику сталеплавильной ванны и связанное с ней перераспределение кислорода по различным частям ванны и, следовательно, процесс рафинирования в целом.

Ключевые слова: «первичная» реакционная зона, «вторичная» реакционная зона, «горячее» моделирование, градиент температуры, поверхностное натяжение, расплавленный металл, газовые пузырьки, капли металла, гидродинамика ванны.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-3-217-222

Технология кислородно-конвертерного производства стали в значительной степени определяется процессами, протекающими в реакционной зоне конвертера, состоящей из «первичной» и «вторичной» зон [1, 2]. «Первичная» зона представляет собой кратер, образовавшийся в результате соударения сверхзвуковой кислородной струи с расплавленным металлом, заполненный каплями расплава диаметром 0,1 – 2,0 мм. Окружающая кратер «вторичная» зона состоит из огромного количества газовых пузырьков диаметром до 4 мм. Образованию пузырьков в расплаве способству-

ет интенсивное акустическое воздействие со стороны сверхзвукового дутья, вызывающее возникновение кавитационных полостей, которые заполняются газообразными продуктами реакции окисления углерода. Суммарная площадь поверхности капель и пузырьков на четыре порядка больше площади спокойного расплава. Это говорит о той роли, которую играют процессы, протекающие на межфазных границах, в конвертерном производстве стали.

Структура реакционной зоны и распределение в ней температуры изучались методом «горячего» моделиро-

вания [3]. Как показали лабораторные эксперименты на «горячих» моделях, реакционная зона имеет значительный перегрев по сравнению с объемом конвертерной ванны. Наибольшая яркость свечения наблюдается в «первичной» реакционной зоне. Выделение тепла происходит за счет реакций окисления примесей и, предполагая, что все полученное тепло идет на нагрев продуктов реакции, температура в подфурменной зоне достигла бы:

– при окислении углерода до двуокиси – около 3000 °С;

– при окислении железа – 4200 – 4400 °С.

Реальная температура этой зоны существенно ниже и составляет 2500 – 2700 °С. Это происходит из-за высокой скорости теплообмена между продуктами реакции с окружающими массами металла и шлака, а также расхода тепла на процессы испарения железа и диссоциации оксидов железа внутри наиболее высокотемпературной части «первичной» реакционной зоны. Предельная температура «первичной» зоны определяется условиями кипения железа и составляет 2735 °С. Эксперименты показали, что яркость свечения различных участков реакционной зоны и части конвертерной ванны, примыкающей к ней, не одинакова. Поэтому немаловажно было определить не столько температуру реакционной зоны, сколько характер распределения яркости свечения в подфурменной зоне [4, 5]. На рис. 1 показаны изотермы зоны продувки – штриховые линии. Сплошная линия соответствует границе, разделяющей «первичную» зону от «вторичной». Линия, соответствующая температуре 1550 °С, является внешней границей «вторичной» зоны, отделяющей ее от остальной конвертерной ванны.

На рис. 1 определено положение изотермы 2500 °С, но внутри этой изотермы рост температуры продолжается и может достигать максимальной величины 2735 °С.

Существует ошибочное мнение, сложившееся из-за публикаций, в которых применялось «холодное» моделирование на воде [6, 7], что металл и пузырьки во «вторичной» реакционной зоне перемещаются вверх, увлекаемые обратным газовым потоком и пузырьками, всплывающими под действием архимедовых сил. В этом случае расплав верхней части «вторичной» зоны должен был продолжать нагреваться за счет теплового воздействия «первичной» реакционной зоны и тепла экзотермических реакций, протекающих внутри него. Однако расплав верхней части зоны нагрет до меньшей температуры, чем нижней. Это может происходить только в том случае, если металл во «вторичной» зоне перемещается не вверх, а в направлении, перпендикулярном поверхности кратера. В этом же направлении, как показал эксперимент, перемещаются пузырьки окиси углерода, которые сильно вспенивают металл. Кислородная струя и обратный газовый поток активно срывают этот металл с поверхности кратера, превращая его в капли, чему особенно способствует нестационарный характер их взаимодействия. Освободившееся место непрерывным потоком занимают новые порции расплава, находящиеся

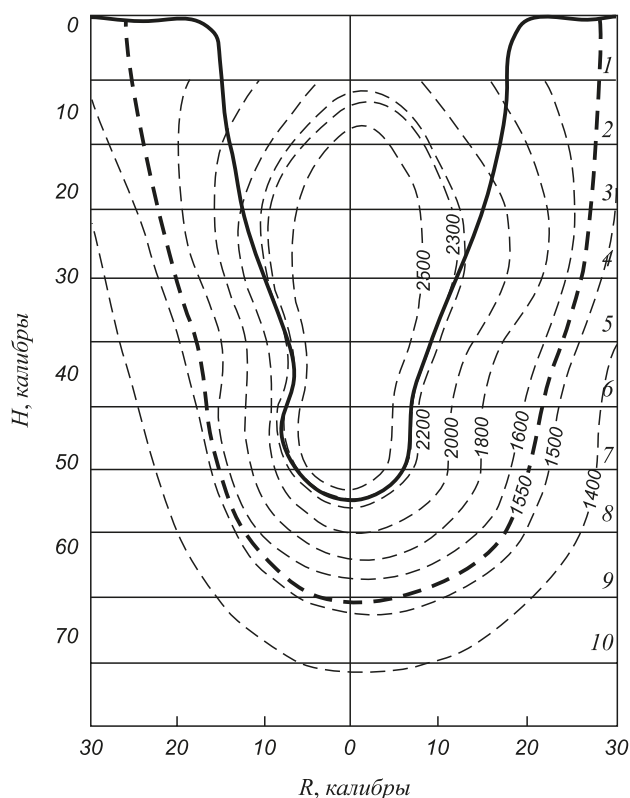


Рис. 1. Изотермы зоны продувки: цифры 1 – 10 у горизонтальных линий обозначают сечения, в которых проводилось фотометрирование; H – глубина в калибрах; R – радиус тигля в калибрах; — — — условная граница, отделяющие «первичную» реакционную зону от «вторичной»; - - - - - условная граница, отделяющие «вторичную» реакционную зону от основной массы металла; - - - - - изотермы

Fig. 1. Blowing zone isotherms
Horizontal lines: numbers 1 – 10 indicate cross-sections after photometric measurement; H – depth in calibers; R – crucible radius in calibers; — — — conditional border between primary and secondary zones; - - - - - conditional border separating secondary zone from the main metal mass; - - - - - isotherms

вблизи «вторичной» реакционной зоны, формируя циркуляционные потоки, практически совпадающие с направлением движения пузырей. Часть капель расплава, выносимых из кратера, попадают в струю окислительного дутья, насыщаются кислородом и, разгоняясь, внедряются во «вторичную» зону, поставляя в нее кислород.

При высоком содержании углерода в расплаве реакционная зона крайне неустойчива, поэтому на кинофрагментах границы, разделяющие «первичную» и «вторичную» реакционные зоны от основной массы металла, несколько размыты. Однако при содержании углерода ниже 0,2 % кратер становится более стабильным, хорошо видны границы зон, отчетливо наблюдается зарождение и дрейф газовых пузырей внутри «вторичной» реакционной зоны. Они двигаются, вопреки сложившимся представлениям, не вверх, а в направлении, перпендикулярном поверхности кратера. Такое движение пузырьков в расплаве объясняется градиентом сил поверхностного натяжения, возникающего за

счет температурного градиента, а также градиента концентраций примесей расплава.

Эксперименты показали, что пузыри в такой жидкости перемещаются в направлении более высоких температур [8]. Природа такого движения заключена в том, что по мере роста температуры жидкости, силы ее поверхностного натяжения уменьшаются. При попадании газового пузыря в жидкость с градиентом температуры поверхностное натяжение до и после пузырька будет различным. Силы, сжимающие пузырек, позади него будут больше, чем спереди и атомы жидкости начнут обтекать пузырек, заставляя его двигаться в сторону уменьшения поверхностного натяжения. Взаимосвязь между поверхностным натяжением до пузырька σ_1 и после σ_2 очевидно будет равна [9,10]:

$$\sigma_2 = \sigma_1 + \left(\frac{\partial\sigma}{\partial t}\right)\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)2r, \text{ Н/м}, \quad (1)$$

где: $\frac{\partial\sigma}{\partial t}$ – температурный коэффициент поверхностного натяжения, Н/(м·град); $\frac{\partial t}{\partial x}$ – градиент температуры, град/м; r – радиус пузыря, м.

Скорость движения инородных фаз определяется из следующего выражения [9]:

$$U = \frac{2r_0}{300(2\mu_1 + 3\mu_2)}\left(\frac{\partial\sigma}{\partial t}\right)\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right), \text{ м/с}, \quad (2)$$

где: U – скорость перемещения газового пузыря (капли) в жидкости, м/с; μ_1 – динамическая вязкость жидкости, Н·с/м²; μ_2 – динамическая вязкость среды внутри пузыря или капли, Н·с/м².

С увеличением температуры поверхностное натяжение жидкости уменьшается, а температурный коэффициент натяжения жидкости отрицателен $\left(\frac{\partial\sigma}{\partial t} < 0\right)$, поэтому движение пузырька будет направлено в сторону увеличения температуры. Для газового пузырька, находящегося в жидкости, $\mu_1 > \mu_2$, тогда формулу (2) можно записать в упрощенном виде:

$$U = \frac{r}{300\mu_1}\left(\frac{\partial\sigma}{\partial t}\right)\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right), \text{ м/с}. \quad (3)$$

В связи с тем, что температура металла на поверхности кратера составляет 2300 °С, а остальной ванны – 1400 °С, скорость движения пузырей за счет градиента температуры может существенно влиять на траекторию их движения внутри «вторичной» реакционной зоны. Выявленное в ходе экспериментов на «горячей» модели направление движения говорит о значительно меньшей величине вертикальной составляющей скорости по сравнению с составляющей, вызываемой градиентом температуры.

Закономерность распределения температуры во «вторичной» реакционной зоне описывается следующим математическим выражением:

$$t = 1400 + 2,5\frac{x^2}{d_{кр}^2}, \text{ }^\circ\text{C}, \quad (4)$$

где: x – расстояние от изотермы 1400 °С до пузыря во «вторичной» реакционной зоне, м, тогда градиент температуры будет равен

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{5}{d_{кр}}x, \text{ град/м}. \quad (5)$$

Подставив это значение в формулу (3), получим

$$U = \frac{r_0}{300\mu_1}\left(\frac{\partial\sigma}{\partial t}\right)\left(\frac{5X}{d_{кр}}\right), \text{ м/с}, \quad (6)$$

где: X – расстояние в калибрах (безразмерная величина).

Однако для железоуглеродистых расплавов поверхностное натяжение с увеличением температуры изменяется неоднозначно. Представляет интерес изучение характера изменения поверхностного натяжения железоуглеродистых сплавов при различной степени нагрева (рис. 2.) [11 – 14].

Таким образом, с повышением температуры до 1550 °С поверхностное натяжение растет, что говорит об ослаблении поверхностной активности углерода. Однако при достижении 1550 – 1600 °С происходит перегиб (значение Δ максимально), после которого поверхностное натяжение начинает уменьшаться, как

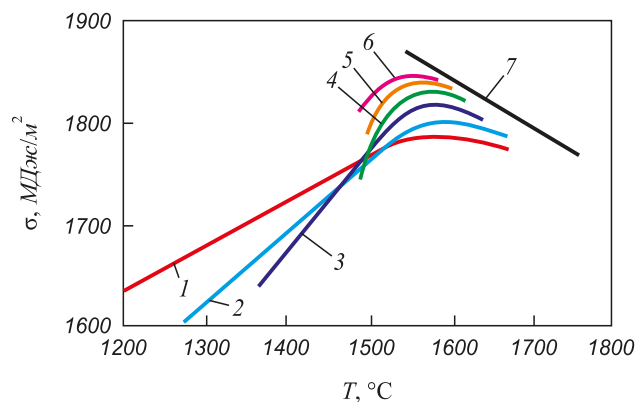


Рис. 2. Зависимость поверхностного натяжения железоуглеродистых расплавов от температуры при следующем химическом составе расплавов, %:

1 – 4,15 [C], 0,0005 [O]; 2 – 3,15 [C], 0,0007 [O]; 3 – 2,25 [C], 0,0006 [O]; 4 – 1,24 [C], 0,0007 [O]; 5 – 0,72 [C], 0,0004 [O]; 6 – 0,50 [C], 0,0007 [O]; 7 – <0,002 [C], 0,001 [O]

Fig. 2. Temperature dependence of iron-carbon melts surface tension. Melts chemical composition:

1 – 4.15[C], 0.0005[O]; 2 – 3.15[C], 0.0007[O]; 3 – 2.25[C], 0.0006[O]; 4 – 1.24[C], 0.0007[O]; 5 – 0.72[C], 0.0004[O]; 6 – 0.50[C], 0.0007[O]; 7 – 0.002[C], 0.001[O]

у чистого железа (см. рис. 2, кривая 7). При этом, чем меньше содержание углерода в расплаве, тем выше точка перегиба. Это является подтверждением тезиса о заметном влиянии его на поверхностное натяжение. Характер изменения поверхностной активности компонентов сталеплавильной ванны хорошо изучен для температур не более 1700 – 1750 °С, а при температурах реакционной зоны изучен мало и требует дополнительных исследований, хотя тенденции изменения поверхностного натяжения и для высоких значений температуры, несомненно, сохраняются. Для реальных железоуглеродистых расплавов характер изменения поверхностного натяжения с увеличением температуры аналогичен [15 – 17]. Температурный коэффициент поверхностного натяжения, характеризующий наклон касательной к кривым изменения поверхностного натяжения, до 1550 °С положителен ($\frac{\partial\sigma}{\partial t} > 0$), а после отрицателен ($\frac{\partial\sigma}{\partial t} < 0$) и приближается к значению, равному для чистого железа $\frac{\partial\sigma}{\partial t} = -0,43$ Н/(м·град). Поэтому движение инородных фаз начинается от изотермы 1550 °С в сторону уменьшения поверхностного натяжения, и она, несомненно, является внешней границей «вторичной» реакционной зоны, отделяющей ее от остальной ванны. Внутри «вторичной» реакционной

зоны находится большое количество пузырьков и кавитационных полостей, и жидкость будет стремиться вытеснить их в сторону увеличения температуры.

На рис. 3 представлен график изменения скорости движения газовых пузырьков радиусом 0,1 – 2,0 мм в зависимости от места их положения внутри «вторичной» реакционной зоны как для горячей модели, так и для 160-т конвертера Нижнетагильского металлургического комбината (НТМК). За начало отсчета положения пузырька принята изотерма 1400 °С, положению 7 калибров соответствует начало вторичной зоны (изотерма 1550 °С), на расстоянии 19 калибров от точки отсчета находится поверхность кратера (изотерма 2300 °С). Из графика видно, что наибольшей скоростью пузыри обладают в момент выхода на поверхность кратера. Промышленные эксперименты с использованием пульсирующего дутья, проведенные на конвертере НТМК, выявили наличие во «вторичной зоне» газовых пузырьков радиусом от 1,5 до 4,5 мм с частотой собственных колебаний 525 – 600 Гц. Скорость всплывания пузырей (вертикальная составляющая) в металле, по данным многочисленных авторов, практически не зависит от объема пузырька и может быть определена по уравнению Франк-Каменецкого [18,19]

$$\omega = 4 \sqrt{\frac{4g^2\sigma_m}{a^2(\rho_{ж} - \rho_{г})}}, \text{ м/с}, \quad (7)$$

где a – коэффициент сопротивления среды ($a \approx 1,3$).

Величина скорости всплывания пузырька, рассчитанная по этой формуле, для стали равна 0,26 м/с. Она меньше скорости, вызываемой изменением поверхностного натяжения в расплаве «вторичной зоны», и поэтому не может заметно влиять на траекторию движения пузырьков радиусом 1 мм вблизи поверхности кратера. На рис. 4 произведено сложение вертикальной и горизонтальной составляющих скорости пузырьков диаметром 0,1 и 1 мм.

Результирующий вектор для пузырька диаметром 0,1 мм направлен под углом 16°, а диаметром 1 мм – под углом 1,6°, что приводит к их слиянию в результате перекрещивающихся траекторий движения.

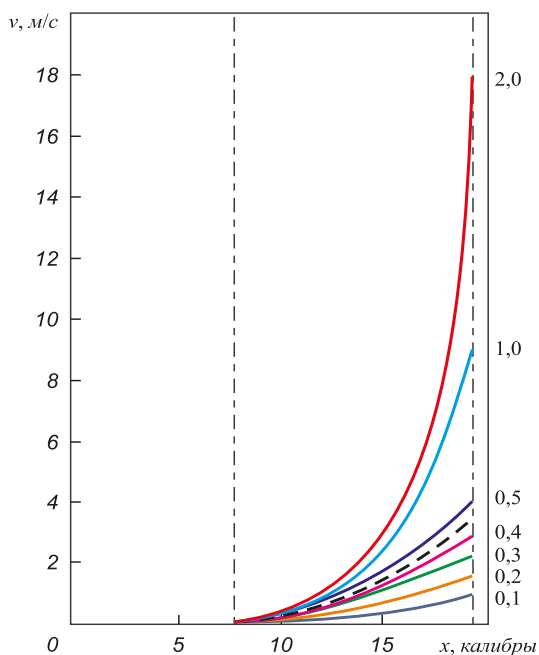


Рис. 3. Скорость перемещения пузырьков во вторичной зоне: цифры у кривых – радиус пузырьков (мм); начало отсчета (0) – изотерма 1400 °С; --- границы вторичной зоны (изотермы 1550 и 2300 °С)

Fig. 3. Bubbles movement velocity in secondary reaction zone: curves numerals mean the bubble radius (mm); isotherm 1400 °С is the beginning of indication; --- secondary zone borders (isotherms 1500 and 2300 °С, respectively)

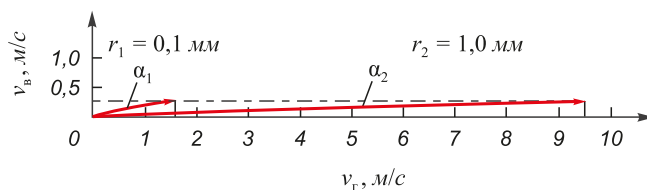


Рис. 4. Сложение вертикального и горизонтального векторов составляющих скорости пузырьков радиусом 0,1 и 1 мм: $\sin \alpha_1 = 0,26/0,95 = 0,27$; $\alpha_1 = 16^\circ$; $\sin \alpha_2 = 0,26/9,5 = 0,027$; $\alpha_2 = 1,6^\circ$

Fig. 4. Addition of vertical and horizontal vectors' velocities components of bubbles of 0.1 mm and 1 mm in radius: $\sin \alpha_1 = 0.26/0.95 = 0.27$; $\alpha_1 = 16^\circ$; $\sin \alpha_2 = 0.26/9.5 = 0.027$; $\alpha_2 = 1.6^\circ$

Необходимо отметить, что низ «вторичной» зоны существенно перегрет по отношению к ее верхней части. Поэтому вертикальный градиент температуры будет способствовать уменьшению вертикального вектора. На величину горизонтального вектора может повлиять существенное изменение содержания примесей в пределах «вторичной» реакционной зоны.

Изменение поверхностного натяжения в пределах «вторичной» зоны, вызываемое каждой примесью расплава, составит [9, 20, 21]:

$$\sigma_{[C]} \approx +25 \text{ мДж/м}^2;$$

$$\sigma_{[Si]} \approx +15 \text{ мДж/м}^2;$$

$$\sigma_{[Mn]} \approx +30 \text{ мДж/м}^2;$$

$$\sigma_{[O]} \approx -(500 \div 600) \text{ мДж/м}^2;$$

$$\Sigma \Delta \sigma \approx -(430 \div 530) \text{ мДж/м}^2.$$

Из приведенных значений видно, что совокупное влияние на поверхностное натяжение расплава во «вторичной» реакционной зоне таких примесей чугуна, как углерод, кремний и марганец даже в начале продувки значительно меньше, чем влияние кислорода, который способствует увеличению горизонтального вектора.

Таким образом, определен характер распределения температуры в подфурменной зоне кислородного конвертера. Градиент температур и концентраций примесей в расплаве «вторичной» зоны приводит к возникновению капиллярных сил (из-за градиента поверхностного натяжения), которые приводят к быстрой эвакуации инородных фаз (в том числе газовых) в сопутствующем потоке самого расплава из этой зоны в направлении, практически перпендикулярном поверхности кратера и изотермам зоны продувки. Это в корне отличается от известной точки зрения, согласно которой инородные включения всплывают вверх внутри «вторичной» зоны под действием архимедовых сил в сопутствующем потоке расплава. Эксперименты на установке «горячего» моделирования показали ошибочность таких воззрений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л. Теория продувки сталеплавильной ванны. – М.: Металлургия, 1974. – 496 с.

2. Баптизмандский В.И., Охотский В.Б. Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса. – Киев-Донецк: Вища школа. Головное изд-во, 1981. – 184 с.

3. Хисамутдинов Н.Е., Явойский А.В., Гребенюк Н.А. Термокапиллярные явления при продувке металлических расплавов // Изв. АН СССР. Расплавы. 1989. Т. 3. № 2. С. 3 – 8.

4. Явойская О.В., Явойский А.В., Хисамутдинов Н.Е., Хисамутдинов С.Н. Температура реакционной зоны кислородного конвертера // Тр. XI Российской конф. «Строение и свойства металлургических расплавов». – Екатеринбург – Челябинск: ЮрГУ, 2004. Т. 2. С. 248 – 250.

5. Явойский В.И., Явойский А.В. Научные основы современных процессов производства стали. – М.: Металлургия, 1987. – 184 с.

6. Баптизмандский В.И. Механизм и кинетика процессов в конвертерной ванне. – М.: Металлургиздат, 1960. – 283 с.

7. Сурин В.А., Назаров Н.Н. Массо- и теплообмен, гидродинамика металлической ванны. – М.: Металлургия, 1993. – 352 с.

8. Явойская О.В., Хисамутдинов Н.Е., Явойский А.В., Хисамутдинов С.Н. Термокапиллярные явления в кислородно-конвертерном процессе // Тр. XIII Российской конф.: «Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов». Т. 2. «Экспериментальное изучение жидких и аморфных металлических систем». – Екатеринбург: УрОРАН, 2011. С. 186 – 189.

9. Адамсон А. Физическая химия поверхностей / Пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 568 с.

10. Джейкок М., Парфит Дж. Химия поверхностей раздела фаз / Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 269 с.

11. Попель С.И. Поверхностные явления в процессах производства стали. В сб.: «Физико-химические основы процессов производства стали». – М.: Наука, 1979. С. 71 – 79.

12. Попель С.И. Поверхностные явления в расплавах. – М.: Металлургия, 1994. – 440 с.

13. Еланский Г.Н., Кудрин В.А. Строение и свойства жидкого металла – технология плавки – качество стали. – М.: Металлургия, 1984. – 239 с.

14. Ниженко В.И., Флока Л.И. Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов (одно- и двухкомпонентные системы): Справочник. – М.: Металлургия, 1981. – 208 с.

15. Марч Н.Г. Жидкие металлы / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1972. – 128 с.

16. Ершов Г.С., Бычков Ю.Б. Свойства металлических расплавов и их взаимодействие в сталеплавильных процессах. – М.: Металлургия, 1983. – 216 с.

17. Арсентьев П.П., Коледов Л.А. Металлические расплавы и их свойства. – М.: Металлургия, 1976. – 376 с.

18. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. 2-е изд. – М.: Наука, 1967. – 492 с.

19. Взаимодействие расплавленного металла с газом и шлаком / С.И. Попель, Ю.П. Никитин, Л.А. Бармин и др. – Свердловск: Изд-во УПИ им. С.М. Кирова, 1975. – 184 с.

20. Вилсон Д.Р. Структура жидких металлов и сплавов / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1972. – 247 с.

21. Жидкая сталь / Б.А. Баум, Г.А. Хасин, Г.В. Тягунов и др. – М.: Металлургия, 1984. – 208 с.

Поступила 13 марта 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. Vol. 61. No. 3, pp. 217–222.

SURFACE PHENOMENA PECULIARITIES IN THE BOF STEELMAKING BATH

N.E. Khisamutdinov, O.V. Yavoiskaya¹, A.V. Yavoiskii²,
S.N. Khisamutdinov³

³ LLC “Siti Rapid”, Moscow, Russia

¹ Urals State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia

² National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

Abstract. BOF steelmaking technology is largely determined with processes taking place in the LD-converter reaction zone, which consists of “primary” and “secondary” sub-zones. The “primary” zone is a crater formed as result of supersonic gas stream impact on metal melt sur-

face, fulfilled with metal droplets of 0.1 – 2 mm in diameter. Surrounding in the “secondary” zone consists of the large amount of gas bubbles of 0.2 – 4 mm in diameter. The total surface area of droplets and bubbles is by four orders of magnitude larger as compared with the stable metal surface of magnitude larger as compared with the stable metal surface place. This suggests important role of interface phenomena at steel refining processes. The reaction zone structure and its temperature distribution were studied with “hot” modeling method, where molten cast iron was blown with oxygen in transparent quartz crucible. Each blow was accomplished with photo- and cinema filming through crucible wall. Besides temperature distribution obtained material also allowed study of metal bath hydrodynamics directly in blowing zone. The most unexpected result here was the motion trajectory of bubbles in the “secondary” zone. They moved normally to the crater surface, i.e. almost in a horizontal direction instead of vertical float as it was noticed at “cold” modeling with water. This very important phenomenon is caused by surface tension in homogeneity, due to which the bubbles are moved at higher temperatures direction. Surface tension forces in front of and behind gas bubble in liquid with temperature gradient are different. Because contact forces behind bubble are larger as compared that in front, it is pushed out in direction of surface tension decrease. Surface tension inhomogeneity is generated with temperature (up to 1200 °C) and oxygen concentration gradients in the “secondary” reaction zone. Iron-carbon surface tension changes with temperature rise inconsistently. Surface tension increases with temperature rise up to 1550 °C. At reaching 1550 – 1600 °C there is a bend, which after surface tension begin to decrease. This bend point is as higher as lower carbon concentration in alloy gas bubbles and heterogeneous phase’s motion in surface decrease direction starts from 1550 °C isotherm. So it is outward border of “secondary” reaction zone, which separates it from main metal bath. Inside it resulting surface tension forces push gas bubbles and slag particles into accelerating motion with mass of metal melt in horizontal direction to the crater. This phenomenon determines whole steelmaking bath hydrodynamics with oxygen redistribution between molten metal components and hence the steel refining process in general.

Keywords: “primary” reaction zone, “secondary” reaction zone, temperature gradient, surface tension, metal melt, gas bubbles, metal droplets, bath hydrodynamics.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-3-217-222

REFERENCES

1. Yavoiskii V.I., Dorofeev G.A., Povkh I.L. *Teoriya produvki staleplavil'noi vannы* [Theory of steelmaking bath blow]. Moscow: Metallurgiya, 1974, 496 p. (In Russ.).
2. Baptizmanskii V.I., Okhotskii V.B. *Fiziko-khimicheskie osnovы kislородно-konvertornogo protsessа* [Physico-chemical foundations of steelmaking process]. Kiev-Donetsk: Vishcha shkola, 1981, 184 p. (In Russ.).
3. Khisamutdinov N.E., Yavoiskii A.V., Grebenyuk N.A. Thermocapillarity phenomena at metal melts blow. *Izv. AN SSSR. Rasplavy*. 1989, vol. 3, no. 2, pp. 3–8. (In Russ.).
4. Yavoiskaya O.V., Yavoiskii A.V., Khisamutdinov N.E., Khisamutdinov S.N. Temperature of BOF reaction zone. In: *Trudy 11 Rossiiskoi konferentsii “Stroenie i svoystva metallicheskih rasplavov”*, t. 2 [Proceedings of 11-th Russian Conf. “Structure and properties of metal melts”. Vol. 2]. Ekaterinburg – Chelyabinsk: YurGU, 2004, pp. 248–250. (In Russ.).
5. Yavoiskii V.I., Yavoiskii A.V. *Nauchnye osnovы sovremennykh protsessov proizvodstva stali* [Scientific foundation of modern steelmaking processes]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 184 p. (In Russ.).
6. Baptizmanskii V.I. *Mekhanizm i kinetika protsessov v konvertornoi vanne* [Mechanism and kinetics of converter bath processes]. Moscow: Metallurgizdat, 1960, 283 p. (In Russ.).
7. Surin V.A., Nazarov N.N. *Masso- i teploobmen, gidrodinamika metallicheskoй vannы* [Mass- and heat exchange, hydrodynamics of metal bath]. Moscow: Metallurgiya, 1993, 352 p. (In Russ.).
8. Yavoiskaya O.V., Khisamutdinov N.E., Yavoiskii A.V., Khisamutdinov S.N. Thermocapillarity phenomena at BOF process. In: *Trudy 13 Rossiiskoi konferentsii “Stroenie i svoystva metallicheskih i shlakovykh rasplavov”*. Vol. 2: *Ekspерimental'noe izuchenie zhidkikh i amorfnykh metallicheskih sistem* [Proceedings of 13-th Russian Conf. “Structure and properties of metal and slag melts”, Vol. 2 Experimental study of liquid and amorphous metal systems]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2011, pp. 186–189. (In Russ.).
9. Adamson A.W. *Physical Chemistry of Surfaces*. New York: J. Wiley, 1982, 664 p. (Russ.ed.: Adamson A. *Fizicheskaya khimiya poverkhnosti*. Moscow: Mir, 1997, 352 p.).
10. Jaycock M.J., Parfitt G.D. *Chemistry of interfaces*. New York: Ellis Horwood Ltd., 1981, 279 p. (Russ.ed.: Jaycock M.J., Parfitt G.D. *Khimiya poverkhnosti razdela faz*. Moscow: Mir, 1984, 269 p.).
11. Popel' S.I. Surface phenomena at steelmaking processes. In: sb.: *Fiziko-khimicheskie osnovы protsessov proizvodstva stali* [Collected articles: Physical-chemical foundation of steelmaking processes]. Moscow: Nauka, 1979, pp. 71–79. (In Russ.).
12. Popel' S.I. *Poverkhnostnye yavleniya v rasplavakh* [Surface phenomena in melts]. Moscow: Metallurgiya, 1994, 440 p. (In Russ.).
13. Elanskii G.N., Kudrin V.A. *Stroenie i svoystva zhidkogo metalla – tekhnologiya plavki – kachestvo stali* [Liquid metal structure and properties – melting technology – steel quality]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 239 p. (In Russ.).
14. Nizhenko V.I., Floka L.I. *Poverkhnostnoe natyazhenie zhidkikh metallov i splavov (odno- i dvukhkompоnentnyе sistemy). Spravochnik* [Surface tension of metals and alloys (mono – and two component systems). Reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1981, 208 p. (In Russ.).
15. March N.H. *Liquid metals*. New York: Pergamon, 1968, 133 p. (Russ.ed.: March N.H. *Zhidkie metally*. Moscow: Metallurgiya, 1972, 128 p.).
16. Ershov G.S., Bychkov Yu.B. *Svoystva metallicheskih rasplavov i ikh vzaimodeistvie v staleplavil'nykh protsessakh* [Metal melts properties and their interaction at steelmaking processes]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 216 p. (In Russ.).
17. Arsent'ev P.P., Koledov L.A. *Metallicheskie rasplavy i ikh svoystva* [Metal melts and their properties]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 376 p. (In Russ.).
18. Frank-Kamenetskii D.A. *Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoi kinetike* [Diffusion and heat transfer in chemical kinetics]. Moscow: Nauka, 1967, 492 p. (In Russ.).
19. Popel' S.I., Nikitin Yu.P., Barmin L.A. etc. *Vzaimodeistvie rasplavlennogo metalla s gazom i shlakom* [Metal melt interaction with gas and slag]. Sverdlovsk: UPI, 1975, 184 p. (In Russ.).
20. *The Structure of Liquid Metals and Alloys*. Wilson J.R. ed. London: The Institute of Metals Publ., 1966, 232 p. (Russ.ed.: Wilson J.R. *Struktura zhidkikh metallov i splavov*. Moscow: Metallurgiya, 1972, 247 p.).
21. Baum B.A., Khasin G.A., Tyagunov G.V. etc. *Zhidkaya stal'* [Liquid steel]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 208 p. (In Russ.).

Information about the authors:

N.E. Khisamutdinov, Dr. Sci. (Eng.), Professor (nehis@yandex.ru)
O.V. Yavoiskaya, Cand. Sci. (Chem.), Assist. Professor of the Chair of Metal Technology and Repair of Machines (metal-01ga@mail.ru)
A.V. Yavoiskii, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection
S.N. Khisamutdinov, Cand. Sci. (Eng.)

Received March 13, 2017