

УДК 669.186.517

Камкина Л.В., Яковлев Ю.Н., Величко А.Г.,  
Стовпченко А.П., Стовба Я.В.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВСПЕНИВАНИЯ  
МЕТАЛЛА ПРИ ВАКУУМИРОВАНИИ НА ОСНОВЕ ФИЗИКО-  
ХИМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЕГАЗАЦИИ**

*Аннотация. Представлена физико-химическая модель процесса окисления углерода в жидкой стали, которая осуществляется в двухфазной системе (металл-газ). Рассмотрены особенности образования и роста пузырей CO и произведена оценка влияния количества центров зарождения пузырей на содержание растворенного кислорода в металле. В процессе окисления углерода образующиеся пузыри CO увеличивают объем металла, в результате чего металл вспенивается. Подъем уровня металла может служить показателем для контроля за ходом процесса.*

*Ключевые слова: вакуумирование, физико-химическая модель, обезуглероживание, пузыри CO, вспенивание металла.*

**Введение**

При ковшевой обработке стали используют совмещенные процессы продувки металла инертными газами и вакуумирование с целью удаления растворенных в металле газов – кислорода и водорода. Удаление растворенного кислорода осуществляется за счет протекания реакции обезуглероживания, а водорода – за счет выделения его в виде молекул, образующих пузырьки газа.

**Модель физико-химических процессов при обезуглероживании стали**

Процесс окисления углерода в жидкой стали протекает в двухфазной системе (металл-газ). При математическом описании и анализе таких процессов необходимо учитывать двух масштабных уровней их реализации: мелкомасштабного (уровня отдельных включений дисперсной фазы) и крупномасштабного (уровня областей, содержащих достаточно большое количество частиц дисперсной фазы) [1]. Сложность такого описания дополняется вероятностными условиями зарождения дисперсной фазы.

---

© Л.В. Камкина, Ю.Н. Яковлев, А.Г. Величко, А.П. Стовпченко, Я.В. Стовба, 2010

В общем виде модель, описывающая крупномасштабный массообмен, состоит из дифференциальных уравнений в частных производных переноса кислорода в шлаке и металле с соответствующими источниковыми членами, уравнения переноса углерода в металле также с источниковыми членами и на границах фаз [2]. Уравнения для одномерного переноса имеют следующий вид:

кислорода в шлак

$$\frac{\partial(O)(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{D_S}{H_S^2} \frac{\partial^2(O)(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{q_{Sl}}{H_S}, \quad (1)$$

кислорода в металле

$$\frac{\partial[O](x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{D_M}{H_M^2} \frac{\partial^2[O](x, \tau)}{\partial x^2} - bV_C + \frac{q_M}{H_M} - \frac{bq_C}{H_M}, \quad (2)$$

углерода в металле

$$\frac{\partial[C](x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{D_M}{H_M^2} \frac{\partial^2[C](x, \tau)}{\partial x^2} - V_C - \frac{q_C}{H_M}, \quad (3)$$

где (O), [O], [C] - концентрации кислорода в шлаке и металле, углерода в металле, кг/м<sup>3</sup>;  $D_S$  и  $D_M$  - эффективные коэффициенты диффузии в шлаке и металле м<sup>2</sup>/с;  $H_S$  и  $H_M$  - толщины слоев шлака и металла, м,  $q_{Sl}$ ,  $q_M$  - источниковые члены, характеризующие поступление дутьевого кислорода в шлак и металл, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $q_C$  - источниковый член, определяющий окисление углерода в реакционной зоне при продувке ванны кислородом, кг/(м<sup>2</sup>·с),  $b$  - пересчетный коэффициент;  $V_C$  - источниковый член, описывающий расход кислорода и углерода на реакцию (скорость окисления углерода), кг/(м<sup>3</sup>·с);  $x$  - безразмерная координата;  $\tau$  - время. Концентрация кислорода в шлаке - (O) рассчитывалась по концентрации (FeO) в шлаке.

Для крупномасштабного уровня [3, 4] реакцию окисления углерода следует рассматривать как квазимогенную и источниковый член, определяющий скорость окисления углерода имеет вид

$$V_C = K_V x^n [C](x, \tau) ([O](x, \tau) - [O]_R(x, \tau)), \quad (4)$$

где  $K_V$  - константа скорости реакции окисления углерода для крупномасштабного уровня, определяемая статистической обработкой экспериментальных и производственных данных; [C] и [O] - текущие локальные концентрации углерода и кислорода,  $[O]_R$  - концентрация кислорода, равновесная с углеродом.

Равновесная с углеродом концентрация кислорода в металле определялась по известному выражению

$$[O]_r(x, \tau) = \frac{P_{AT} + \rho \cdot g \cdot H_M \cdot (1-x) \cdot 10^{-5}}{K_C \cdot [C] \cdot (x, \tau)}, \quad (5)$$

где  $P_{AT}$  – давление над расплавом,  $\rho$  – плотность металла, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $K_C$  – константа равновесия реакции обезуглероживания, которая была пересчитана для концентраций, выраженных в кг/м<sup>3</sup>. В алгоритме решения модели заложено условие зарождения пузырей СО на подине и роста их со скоростью, пропорциональной площади их поверхности. Для расчетов эффективных коэффициентов диффузии с учетом мощности перемешивания и глубины слоев металла и шлака использованы выражения полученные по данным гидравлического моделирования [4]. Расчетами И.Г. Казанцева [5] показано, что собственно химическая реакция между кислородом и углеродом достигает равновесия за  $10^{-6}$  с и не может лимитировать процесса окисления углерода.

Использование модели к конкретным агрегатам осуществлялась постановкой граничных условий и выбором источников членов. Для мартеновских и электрических печей без продувки ванны кислородом на границе газ-шлак принято граничное условие второго рода

$$\frac{D_S}{H_S} \cdot \frac{\partial(O)(1, \tau)}{\partial x} = q_g, \quad (6)$$

где  $q_g$  – поток кислорода на поверхность ванны (окислительная способность печи), кг/(м<sup>2</sup>с). На границе шлак-металл приняты граничные условия третьего рода.

$$\frac{D_S}{H_S} \frac{\partial(O)(0, \tau)}{\partial x} = \frac{D_M}{H_M} \frac{\partial[O](1, \tau)}{\partial x} = \beta_S [a_{FeO} \cdot L_0 - [O](1, \tau)], \quad (7)$$

где  $\beta_S$  – коэффициент массопередачи между шлаком и металлом, м/с;  $a_{FeO}$  – активность (FeO) в шлаке;  $L_0$  – коэффициент распределения кислорода между металлом и шлаком, пересчитанный на концентрации, выраженные в кг/м<sup>3</sup>. Для уравнений на подине и на границе металл-шлак устанавливаются условия непроницаемости:

$$\frac{\partial[C](1, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial[O](0, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial[C](0, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

Источниковые члены -  $q_s$ ,  $q_r$ ,  $q_M$ ,  $q_C$  задавались, исходя из конкретных условий процесса, то же относится и к начальным условиям:

$$(O)(x,0) = (O)_n; [C](x, 0) = [C]_n; [O](x, 0) = [O]_n \quad . \quad (9)$$

Численная реализация модели крупномасштабного уровня производилась по явной конечно-разностной схеме.

Система уравнений переноса мелкомасштабного уровня составлена на основе теории диффузионного переноса, который и лимитирует процесс обезуглероживания. В основу расчетов положено дифференциальное уравнение приращения массы пузыря CO через диффузионный поток кислорода из объема металла к поверхности пузыря:

$$dm = \beta_0 S ([O] - [O]_r) d\tau, \quad (10)$$

где  $S$  - поверхность пузыря,  $\tau$  - время,  $\beta_0$  - коэффициент массоотдачи кислорода из объема металла к поверхности пузыря, величина которого для примесей, растворенных в металле, определяется по формуле Ричардсона:

$$\beta \approx 0,8 \cdot \left( \frac{D \cdot g^{1/2}}{r^{1/2}} \right)^{1/2}, \quad (11)$$

где  $D$  - коэффициент диффузии примеси в металле;  $r$  - радиус пузыря. За основу расчетов положено грибовидная форма пузыря.

#### Оценка вероятности зарождения и роста пузырей

Математическое описание процесса обезуглероживания только на уровне мелкомасштабного массообмена требует определения количества центров образования пузырей, частоты их образования и скорости роста.

Согласно известным данным [6], пузырь радиусом 0,0005 - 0,001 см существовать не может из-за высокого давления сил поверхностного натяжения. В работе принято, что сечение поры на границе с металлом - круг, а зародыш пузыря имеет сферическую форму с радиусом равным радиусу поры. Рост пузыря продолжается до достижения им отрывного радиуса, равного

$$r_{OT} = \left( \frac{3 \cdot r_p \cdot \sigma}{2 \cdot g \cdot (\rho_M - \rho_0)} \right)^{1/3}, \quad (12)$$

где  $r_P$  - радиус поры,  $\sigma$  - поверхностное натяжение,  $\rho_M$  и  $\rho_G$  - плотности металла и СО в пузыре. Приращение массы пузыря в процессе роста

$$dm = \beta_O \cdot S \cdot ([O] - [O]_R) d\tau, \quad (13)$$

где  $S$  - поверхность пузыря,  $\tau$  - текущее время.

Подстановка величин поверхности и объема пузыря в уравнение приращения массы пузыря (13) дает выражение

$$dr = \frac{\beta_O \cdot ([O] - [O]_R)}{\rho_\delta} d\tau. \quad (14)$$

Для постоянной глубины зарождения пузыря СО

$$\rho_\delta = \frac{28 \cdot P_{MAX}}{1000 \cdot R \cdot T}, \quad (15)$$

где  $P_{MAX} = P_{AT} + \rho_M g H_M + \rho_S g H_S + 2\sigma / r$  - максимальное давление на глубине зарождения пузыря, в котором,  $\rho_S$  и  $H_S$  плотность и толщина слоя шлака. Величина  $\beta_O$  может быть вычислена по формуле (11), в которую скорость всплывания введена как функция радиуса

$$\beta_O = \left( \frac{D_O g^{1/2}}{r^{1/2}} \right)^{1/2}, \quad (16)$$

где  $D_O$  - коэффициент диффузии кислорода в металле.

После подстановки (16) в (14) имеем

$$r^{1/4} dr = \frac{D_O^{1/2} \cdot g^{1/2} \cdot ([O] - [O]_R)}{\rho_\delta} d\tau, \quad (17)$$

где  $[O]_R = P_{MAX} / K_C / [C]$ ,  $K_C$  - константа равновесия реакции окисления углерода, пересчитанная на концентрацию в кг/м<sup>3</sup> и давление в Па. После интегрирования по радиусу от  $r_P$  до  $r_{OT}$  и времени от 0 до  $t_{OT}$  получим время от начала роста пузыря на поре до его отрыва, с

$$\tau_{OT} = \frac{(r_{OT}^{1,25} - r_P^{1,25}) \cdot \rho_\delta}{1,25 \cdot D_O^{0,5} \cdot g^{0,25} \cdot ([O] - [O]_R)}. \quad (18)$$

Если после отрыва пузыря от поры сохраняется его зародыш исходного размера, из которого растет новый пузырь, то частота образования пузырей из одного центра будет, 1/с

$$\nu = 1/\tau_{OT} \quad (19)$$

Скорость окисления углерода из расчета на 1 м<sup>2</sup> поверхности расплава, выраженная через массу пузырей при этом будет

$$V_C = \frac{12}{28} \cdot \frac{60 \cdot m_p \cdot n \cdot N_p}{\tau_{OT} \cdot H_M}, \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{мин}), \quad (20)$$

где  $m_p$  - масса одного пузыря на выходе, кг;  $n$  - количество центров зарождения пузырей,  $1/\text{м}^2$ ;  $N_p$  - количество пузырей, образующихся после деления одного пузыря, достигшего критического радиуса.

С использованием построенной модели было определено влияние количества центров зарождения пузырей, радиуса пор и потока кислорода на содержание растворенного кислорода в металле. С уменьшением числа центров зарождения растет содержание кислорода в металле, а следовательно, согласно (18), и меньшее время роста для отрыва их от поры.

Влияние радиуса поры (начального радиуса пузыря СО) на окисленность металла при радиусах пор 0,1; 0,05; 0,01; 0,005; 0,001 см, глубине ванны 1 м и количестве центров зарождения 10000  $1/\text{м}^2$  представлено на рис. 1. С уменьшением радиуса зародыша окисленность металла несколько возрастает, однако в основном находится в пределах обычных значений, и только при радиусе 0,001 см, что близко к критическому значению [6], окисленность существенно выходит за эти пределы.

#### Обработка стали в вакууме с продувкой аргоном

При обработке стали в вакууме с одновременной продувкой аргоном описание процесса обезуглероживания при крупномасштабном переносе описывается уравнениями (2) – (3). Так как при этом наводится нейтральный шлак, то уравнение (1) в модель не включается. Концентрация кислорода, равновесная с углеродом выражается уравнением

$$[O]_r(x, \tau) = \frac{P_{AT} + \rho_M g H_M (1-x) + \rho_{Ш} g H_S + 2\sigma/r}{K_C[C](x, \tau)}, \quad (21)$$

где  $P_{AT}$  - остаточное давление в вакууматоре, Па.

Приращение массы пузыря  $m$  при этом будет

$$dm = \beta_O \cdot S \cdot ([O] - [O]_r) d\tau, \quad (22)$$

Площадь поверхности пузыря определяется его объемом и формой. Объем пузыря СО при всплывании возрастает вследствие увеличения массы и снижения гидростатического давления

$$V = \frac{1000 \cdot m}{28} \cdot \frac{R \cdot T}{P_{MAX} - \rho_M \cdot g \cdot H_M \cdot x}, \quad (23)$$

масса пузыря, выраженная через радиус -  $r$ , будет

$$m = \frac{0,34 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot (P_{MAX} - \rho_M \cdot g \cdot H_M \cdot x)}{(1000/28) \cdot R \cdot T} \quad (24)$$

Однако, несмотря на снижение скорости окисления углерода со временем, общий характер ее изменения по высоте остается одним и тем же (рис. 2). Такой характер окисления углерода по высоте приводит к тому, что в верхних горизонтах (примерно 20% от высоты слоя металла) окисляется 70 - 75 % всего углерода. При этом содержание углерода и кислорода вверху ниже, чем внизу, однако разница концентраций не превышает 1 - 5 % относительных, что связано с довольно высокой мощностью перемешивания.

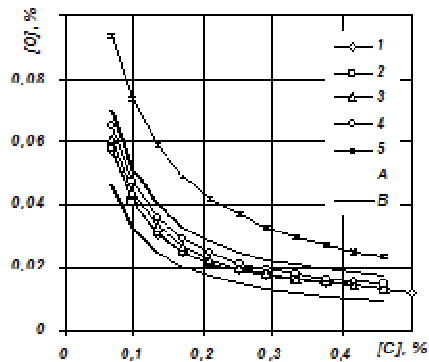


Рисунок 1 - Влияние радиуса пор на концентрацию растворенного кислорода в металле: 1 - 0,1; 2 - 0,05; 3 - 0,01; 4 - 0,005; 5 - 0,001 см; А-В - область данных

В.И. Явойского [6]

В реальных условиях вакуумной обработки стали в ковшах с продувкой инертными газами удаление водорода и кислорода в газовую фазу может осуществляться по трем статьям: в пузыри СО, в пузыри инертного газа и через поверхность металла, чистую от шлака. Во всех этих трех случаях к границе металл – газовая фаза из металла направлены три потока: водорода, углерода и кислорода. При этом можно считать, что поток углерода эквивалентен потоку кислорода для образования СО.

Образующиеся при окислении углерода при отсутствии других газов пузыри СО в момент зарождения и до отрыва от центров зарождения практически не содержат водорода. При наличии в металле нескольких растворенных газов их парциальные давления в

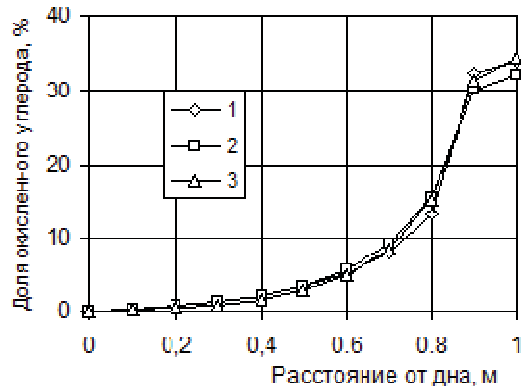
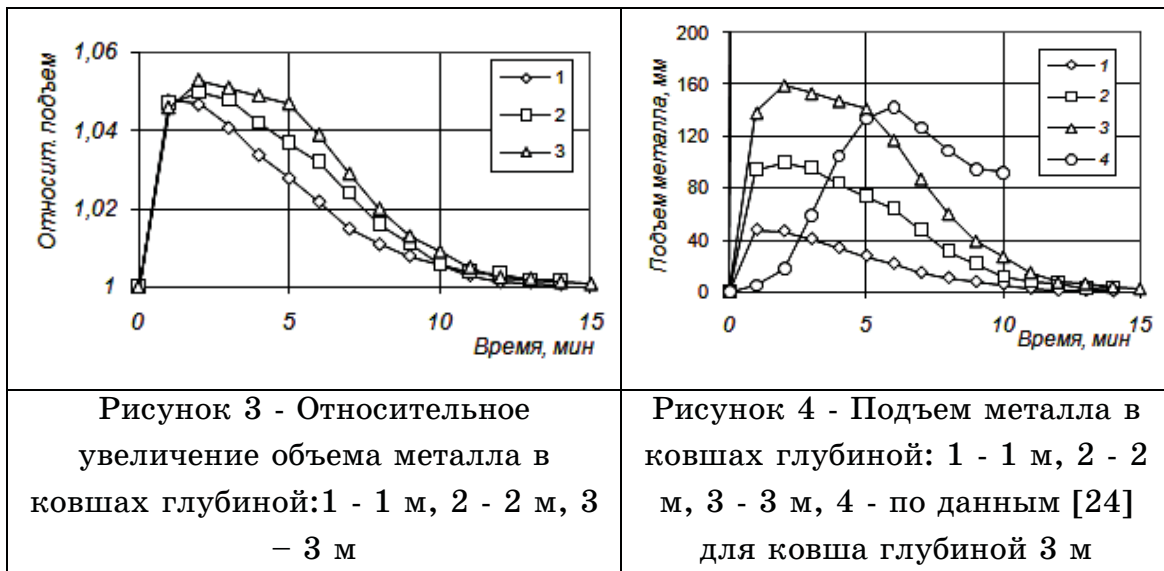


Рисунок 2 - Доля окисленного углерода по высоте слоя металла через 1 - 1 мин., 2 - 2 мин., 3 - 3 мин

образующихся пузырях должны быть равновесными с содержанием газов в металле.

В процессе окисления углерода образующиеся пузыри CO при их расширении в металле, особенно в верхних горизонтах, увеличивают его объем, в результате чего металл вспенивается и уровень его в ковше повышается. Подъем уровня металла может служить показателем для контроля над ходом процесса. В связи с этим представляет интерес возможность прогнозирования величины вспенивания металла по ходу процесса в зависимости от условий его проведения.

Результаты моделирования приведены на рис. 3 ( $[C] = 0,3 \%$ ,  $[O] = 0,012 \%$ ), из которого следует, что относительная высота подъема металла слабо зависит от глубины ковша, несколько возрастая с ее повышением. Соответственно, абсолютная высота подъема металла (рис. 4) возрастает практически пропорционально глубине металла в ковше, что связано главным образом с увеличением объема газов, находящихся одновременно в металле (возрастает время их всплытия).



Приведенные на рис. 4 практические данные для случая одновременного вакуумирования и продувки аргоном в ковшах глубиной около 3 м близки по величине, но максимум достигается позже, что связано с нарастанием интенсивности подачи аргона во времени.



### ЛИТЕРАТУРА

1. Яковлев Ю. Н., Камкина Л. В. Математическая модель обезуглероживания жидкой стали с учетом микро- и макропереноса // Вестник приазовского государственного технического университета. - Вып. № 7. Мариуполь. - ПГТУ, 1999. - С. 63-71.
2. Слободов Е. Б., Кутепов А.М., Чепура И.В.Обобщенный анализ процессов переноса в двухфазных средах (обобщенные переменные). Журнал прикладной химии, том LIX, №2, 1986, с.325-333.
3. Явойский В. И. Газы в ваннах сталеплавильных печей.- М.: Metallurgizdat. - 1952. - 246 с.
4. Иванов А. В., Яковлев Ю. Н. Моделирование процессов перемешивания в ваннах металлургических агрегатов при барботаже. Теория и практика металлургии. 1998, № 2. С. 12 - 15.
5. Казанцев И.Г. Скорость химического процесса взаимодействия углерода с кислородом, находящихся в жидкой стали // Вопросы теории и практики сталеплавильного производства; Сб. науч. тр.- М.: Metallurgiya, 1991.- С. 6-14.
6. Явойский В. И. Теория процессов производства стали. -М.: Metallurgizdat, 1963. - 820 с.