

## ФІЗИЧНА ХІМІЯ ТА ТЕОРІЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 669.18.001.57

Камкіна Л.В.<sup>1</sup>, Яковлев Ю.Н.<sup>2</sup>, Стовба Я. В.<sup>3</sup>, Камкін В.П.<sup>4</sup>

### ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ УГЛЕРОДА И КИСЛОРОДА ПО ВЫСОТЕ МЕТАЛЛА ПРИ КОВШЕВОЙ ОБРАБОТКЕ

*Приводятся результаты расчета отношений концентраций кислорода по высоте ковша по ходу процесса обезуглероживания. Как при окислительной плавке, так и при вакуумном обезуглероживании максимальные разности концентраций в верхних и нижних слоях составляют для кислорода около 12 % относительных, для углерода – около 0,2 % относительных.*

**Ключевые слова:** ковшевая обработка, обезуглероживание, вакуумирование, диффузия, барботаж.

**Камкіна Л.В., Яковлев Ю.М., Стовба Я.В., Камкін В.П. Числова оцінка зміни концентрації вуглецю і кисню по висоті металу при ковшовій обробці.**

*Приведено результати розрахунку співвідношень концентрацій кисню по висоті ковша у процесі зневуглецювання. Як при окислювальній плавці, так і при вакуумно-му зневуглецюванні максимальні різниці концентрацій у верхніх і нижніх шарах складають для кисня близько 12% відносних, для вуглецю – близько 0,2% відносних.*

**Ключові слова:** ковшова обробка, зневуглецювання, вакуумування, дифузія, барботаж.

**L.V. Kamkina, Yu.N. Yakovlev, Ya.V. Stovba, V.P. Kamkin, Numerical evaluation of changing concentration of carbon and oxygen along the full height of metal during ladle treatment.**

*The results of calculation of the ratio of oxygen concentrations at the bottom and top of the bath during the process is given. As for the oxidizing smelting, and in the vacuum decarburization the maximum concentration difference in the upper and lower layers up to about 12% oxygen, to carbon - about 0,2%.*

**Keywords:** ladle treatment, decarburization, vacuum, diffusion, bubbling.

**Постановка проблемы.** Повышение качества стали достигается за счет снижения содержания вредных примесей, газов и неметаллических включений, в том числе кислорода и окисных включений. Проведение необходимых для этого операций в самом сталеплавильном агрегате требует дополнительных затрат времени, что снижает его производительность. В связи с этим значительная часть операций рафинирования стали перенесена в ковши. Одним из широко распространенных методов ковшевой обработки стали является ее обработка в вакууме или вакуумирование. Снижение остаточного давления в вакуум-камере приводит к изменению состояния реакций, в которых принимают участие газы. В первую очередь это реакция окисления углерода и реакции растворения газов в стали. Выделяющиеся при реакции газы, всплывая в виде пузырей, обеспечивают перемешивание металла.

Основной реакцией, в значительной мере определяющей ход процесса вакуумирования жидкой стали, является реакция окисления углерода, условия протекания которой существенно отличаются от тех, что имеются при нормальном атмосферном давлении. Снижение внешнего

<sup>1</sup> д-р техн. наук, профессор, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск

<sup>2</sup> д-р техн. наук, профессор, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск

<sup>3</sup> канд. техн. наук, доцент, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск

<sup>4</sup> ст. науч. сотр, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск

давления сдвигает эту реакцию вправо, что приводит к снижению концентрации растворенного кислорода и удалению его в виде газа CO без образования неметаллических включений, т. е. к так называемому “углеродному” раскислению стали.

Окисление углерода в металле во всех сталеплавильных процессах сопровождается образованием пузырей CO, которые при всплывании совершают работу, обеспечивающую перемешивание металла, что ускоряет процессы теплообмена и массообмена. Важным следствием интенсификации массообмена является изменение распределения углерода и кислорода по высоте слоя металла.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Обеспечение качества и стабильности свойств готовой продукции, отвечающих передовому уровню металлургического производства основывается на создании новых и совершенствовании существующих технологических процессов, управление которыми в современных условиях требует соответствующего информационного обеспечения. При этом важным становится создание физико-химических и детерминированных математических моделей, адекватных реальным металлургическим процессам, которые могут служить эффективным инструментом при их исследовании, прогнозировании и оптимизации.

Значительный вклад в решение тех или иных вопросов этой проблемы за длительный период ее осуществления внесли как отечественные, так и зарубежные ученые: В. Е. Грум-Гржимайло, М. М. Карнаухов, К. Денбиг, И. И. Пригожин, П. В. Гельд, О. А. Есин, А. И. Вейник, С. И. Попель, Явойский В.И., Меджибожский М. Я., В. П. Цимбал и другие.

Однако в настоящее время эта проблема еще далека от своего завершения. Важным шагом в ее решении является комплексный подход, который включает синтез детерминированных физико-химических и математических моделей, их использование в качестве аппарата для исследования процессов, позволяющего связать влияние факторов и параметров, характеризующих процесс и на этой основе получить их оптимальные соотношения. В свою очередь синтез физико-химических и математических моделей требует глубокого анализа и изучения неравновесности и необратимости при взаимодействии нескольких открытых термодинамических систем, возможных в металлургических процессах; установление закономерностей кинетики и скорости расходования углерода и кислорода и их распределения между фазами и элементами; определение характеристик завершенности процессов тепло- и массообмена между компонентами взаимодействующих фаз.

**Цель статьи.** На основе использования расчетного метода оценить характер распределения потоков кислорода и углерода по высоте ковша при изменении условий перемешивания.

**Изложение основного материала.** Различные виды ковшевой обработки широко используются при получении качественной стали. Одной из задач ковшевой обработки является снижение концентрации растворенных газов – кислорода, водорода, азота. Основным методом удаления водорода и азота является перевод их в газовую фазу, что достигается снижением остаточного давления газов над поверхностью металла или продувкой металла инертными газами. Снижение содержания кислорода в металле обеспечивается протеканием реакции окисления углерода до CO в прямом направлении, что обеспечивается снижением парциального давления CO, уменьшением остаточного давления газовой фазы над металлом или продувкой металла инертным газом.

Наиболее распространенным методом при изучении этого процесса является отбор проб по высоте слоя металла [1]. Возможно оценить распределение углерода и кислорода по высоте слоя металла расчетными методами.

Перемешивание жидкости при барботаже может быть охарактеризовано некоторой средней скоростью ее движения, вызванной работой сил трения, численно равных, но противоположно направленных архимедовым силам всплывающих пузырей. В процессе всплывания в металле на пузырь действуют две силы: архимедова и гравитационная. В связи с тем, что гравитационная сила, действующая на пузырь на 3 - 4 десятичных порядка меньше архимедовой, в дальнейших расчетах ею пренебрегали. Элементарная работа архимедовых сил одиночного пузыря на участке всплывания  $dh$  будет:

$$dA = \rho_M V(h)gdh, \quad (1)$$

где  $\rho_M$  - плотность металла,  $V(h)$  – объем пузыря в функции высоты от начала его всплывания.

Задача расчета работы и мощности перемешивания для пузыря постоянной массы была решена В. С. Кочо [2], – однако при всплывании пузыря CO его масса возрастает и объем  $V$  является функцией давления столба металла и приращения массы за счет реакции между углеро-

дом и кислородом [3]. Перемешивание жидкости при барботаже осуществляется за счет движения металла, вызванного всплыванием пузырей, в результате чего в объеме металла возникают восходящие потоки, а между ними - нисходящие.

Теоретически показано, что эффективный (турбулентный) коэффициент диффузии, являющийся следствием циркуляции металла, будет функцией удельной мощности перемешивания –  $N_{UD}$  и характерного размера турбулентного вихря, за который принята длина пути всплывания пузыря –  $H_P$  [4]

$$D_M \approx k N_{UD}^{1/3} H_P^{4/3}, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от условий барботажа и определяемый экспериментально;  $N_{UD}$  – удельная мощность перемешивания;  $N_{UD} = N_A / M_M$ ,  $N_A$  – полная мощность перемешивания,  $M_M$  – масса металла в барботируемой емкости.

Работа перемешивания –  $A_S$  для пузырей, образующихся на одном центре зарождения вычисляется по формуле

$$A_S = \int_0^{H_M} Vp(x)n(x)\rho_M g dx, \quad (3)$$

где  $Vp(x)$  – функция объема пузыря по координате,  $n(x)$  – функция количества пузырей, образовавшихся на одном центре зарождения пузырей при их делении. В связи со сложным выражением указанных функций решение уравнения (3) производилось численным методом с использованием ранее разработанных моделей окислительного и вакуумного обезуглероживания [5, 6]. Удельная мощность перемешивания рассчитывалась по формуле:

$$N_{UD} = \frac{A_S v}{M_M}, \quad (4)$$

где  $v$  – общая частота образования пузырей, 1/с.

Методами физического моделирования с учетом масштабного коэффициента [7] получено выражение для расчета эффективного коэффициента диффузии в случае вертикального переноса в металлическом расплаве

$$D_M = 0,288 N_{ud}^{1/3} H_M^{4/3}. \quad (5)$$

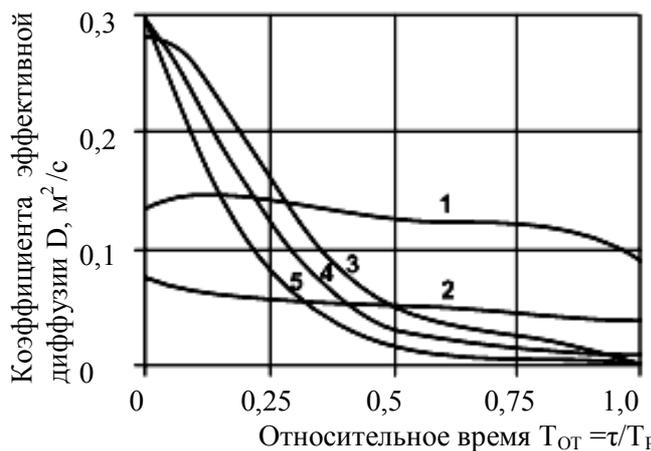


Рис. 1 - Изменение коэффициента эффективной диффузии по ходу процесса подовой плавки (кривые 1-2) и вакуумирования (кривые 3-5):  
 1 – глубина ванны 1 м; 2 – 0,5 м; 3 – глубина ковша 3 м, 4 – 2 м, 5 – 1 м

Расчетные значения эффективных коэффициентов диффузии для различных случаев обезуглероживания приведены на рис.1. В качестве подового агрегата принята подовая печь с окислительной способностью 12 кг/(м<sup>2</sup>·час) кислорода; для процесса вакуумного обезуглероживания – вакуумирование в ковше. Для совмещения на одном графике различных процессов на оси абсцисс отложено относительное время  $T_{OT} = \tau/T_P$  ( $\tau$  – текущее время процесса,  $T_P$  – продолжительность процесса обезуглероживания).

Для подовых агрегатов коэффициент эффективной диффузии зависит от глубины ванны – возрастает работа всплывания пузыря и слабо меняется по ходу процесса. При вакуумном обезуглероживании изменения  $D_M$  носят обратный характер. Величины эффективных коэффициентов диффузии на 8-9 десятичных порядков выше молекулярных и одинаковы для всех примесей металла.

Распределение углерода и кислорода по высоте слоя металла определялось решением математических моделей обезуглероживания в подовых агрегатах [5] и вакуумных установках [6]. При этом необходимо учитывать следующие обстоятельства. При окислительной плавке в по-

довых печах основной поток кислорода направлен сверху вниз. Для поступления кислорода в нижние слои ванны должен быть соответствующий градиент концентраций и содержание кислорода в нижних горизонтах ванны должно быть ниже, чем в верхних. Более высокие концентрации кислорода в верхних горизонтах, а также большая площадь поверхности пузырей в верхних слоях металла должны приводить к большей скорости окисления углерода в верхних горизонтах, и, как следствие, концентрация углерода в верхних горизонтах должна быть меньше чем в нижних.

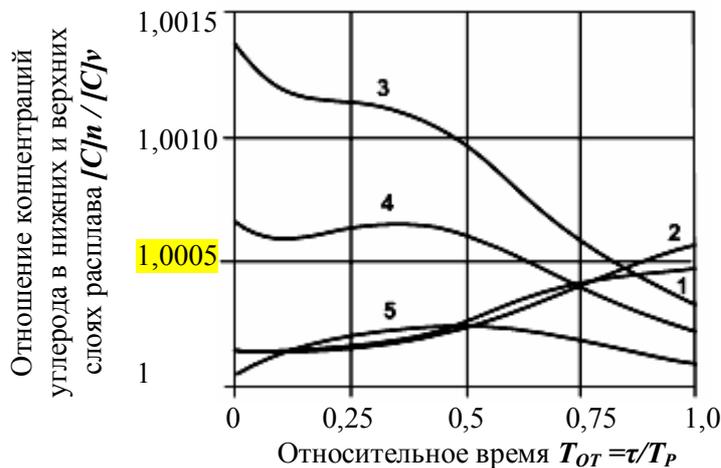


Рис. 2 - Отношение концентраций углерода внизу и вверху ванны по ходу процесса. Обозначения см. на рис.1

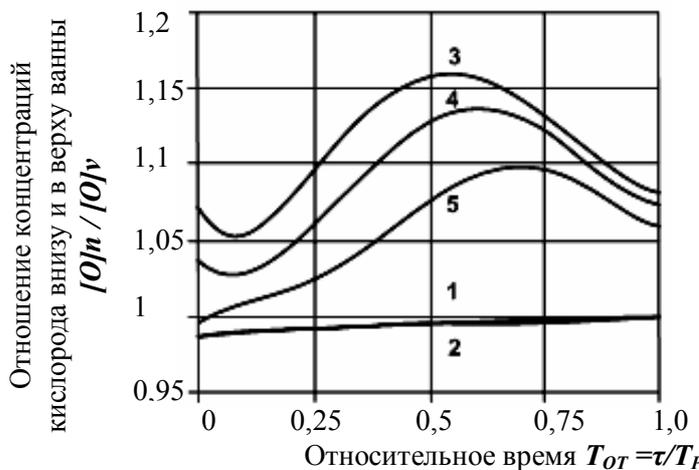


Рис. 3 - Отношение концентраций кислорода внизу и вверху ванны по ходу процесса. Обозначения см. на рис.1

дования на окисления и переносом по высоте. При малых скоростях окисления небольшого перемешивания достаточно для относительного равномерного распределения элемента по высоте. С увеличением глубины ковша отношение концентраций несколько возрастает, что связано с удлинением пути диффузии.

Следует отметить, что отношение концентраций углерода внизу и вверху слоя металла для обоих случаев обезуглероживания мало и находится в пределах 0,05-0,15% относительных. Отношение концентраций кислорода для окислительной плавки составляет около 2% отн., а при вакуумном обезуглероживании – в среднем около 10% отн., но может достигать и 15% отн.

**Список использованных источников:**

1. Явойский В.И. Газы в ваннах сталеплавильных печей [Текст] / В.И. Явойский. – М.: Металлургиздат, 1952. – 246 с.

При вакуумном обезуглероживании при отсутствии шлака (“чистое” вакуумирование) нет поступления кислорода в металл извне, но скорость реакции обезуглероживания связана с площадью поверхности пузырей, в связи с чем, скорость окисления углерода и доля выгоревшего углерода в верхних горизонтах выше, чем в нижних., что должно приводить к более низким концентрациям кислорода и углерода в верхних горизонтах металла. Следует учитывать, что при окислительном обезуглероживании скорость окисления углерода [3] снижается относительно медленно, а при вакуумном, в связи с уменьшением концентрации кислорода, в начальные периоды сравнительно быстро с последующим резким затуханием.

Отношение концентраций углерода в нижних  $[C]_n$  и верхних  $[C]_v$  слоях расплава (рис. 2) подтверждает высказанные выше соображения. Отношение концентраций кислорода внизу  $[O]_n$  и вверху  $[O]_v$  ванны (рис. 3) имеет более сложный характер.

**Выводы**

При повышении удельной мощности перемешивания и равномерном начальном распределении кислорода по высоте это распределение сначала растет, а затем падает. Такой характер распределения связан с двумя факторами: скоростью расхо-

2. Кочо В.С. Кипение жидкого металла в ванне сталеплавильной печи [Текст] / В.С. Кочо // Сталь. 1945. – №2 – 3. – С. 55–60.
3. Меджибожский М.Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов [Текст] / М.Я. Меджибожский. - Киев; Донецк: Вища школа, 1986. – 280 с.
4. Варенцов А. А. О термодинамическом анализе процессов перемешивания расплавов [Текст] / А. А. Варенцов, Е. А. Капустин // Изв. АН СССР. – Металлы. – 1983. - № 6. - С. 23–32.
5. Яковлев Ю.Н. Математическая модель обезуглероживания жидкой стали с учетом микро- и макропереноса [Текст] / Ю.Н. Яковлев, Л.В. Камкина // Вестник Приазовского государственного технического университета. – Вып. № 7. Мариуполь. – ПГТУ, 1999. – С. 63–71.
6. Яковлев Ю.Н. Математическая модель окисления углерода при вакуумной обработке стали в ковшах [Текст] / Ю.Н. Яковлев, А. Г. Величко, Л.В. Камкина // Вестник Приазовского государственного технического университета. – Вып. № 10. Мариуполь. – ПГТУ, 2000. – С. 45 – 52.
7. Иванов А. В. Моделирование процессов перемешивания в ваннах металлургических агрегатов при барботаже / А. В. Иванов, Ю. Н. Яковлев // Теория и практика металлургии. – 1998. - № 2. -С. 12–15.

Рецензент: Б.М. Бойченко  
д-р техн. наук, проф., НМетАУ

Статья поступила 02.12.2010

УДК 669.431.6.

Мешалкин А.П.<sup>1</sup>, Анкудинов Р.В.<sup>2</sup>, Колбин Н.А.<sup>3</sup>

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДУТЬЕВОГО И ШЛАКОВОГО РЕЖИМОВ  
КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ ПРИ РЕГЛАМЕНТИРОВАННОМ ВВОДЕ  
КОМПЛЕКСНЫХ ДОБАВОК МНОГОЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

*В статье рассмотрено влияние шлакообразования на дутьевой режим конвертерной плавки при использовании комплексных шлакообразующих на основе техногенных отходов.*

**Ключевые слова:** кислородный конвертер, дутьевой режим, шлакообразование, техногенные отходы.

*Мешалкин А.П., Анкудинов Р.В., Колбин Н.А. Вдосконалення дутьєвого та шлакового режимів конвертерної плавки при регламентованому введенні комплексних домішок багатоцільового призначення. У статті розглянуто вплив шлакоутворення на дутьєвий режим конвертерної плавки при використанні комплексних шлакоутворюючих на основі техногенних відходів.*

**Ключові слова:** кисневий конвертер, режим дуття, шлакоутворення, техногенні відходи.

*A.P. Mishalkin, R.V. Ankudinov, N.A. Kolbin. Improvement of blowing and slag-regimes of converter process with regulated entering of complex additions, that are multi-purpose. The article considers the influence of slag-making on blowing regim in converter process by using complex slag-making components based on man-made waste.*

**Keywords:** oxygen converter, blowing, slag-making, man-made wastes.

**Постановка проблемы.** Наиболее эффективным направлением совершенствования кислородно-конвертерного процесса, остается оптимизация дутьевых режимов, обеспечивающая в агрегатах с существующими способами продувки ванны, наряду с регулируемым рассредоточением вдуваемого кислорода, процессы шлакообразования, определяющие завершенность ос-

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск

<sup>3</sup> канд. техн. наук, доцент, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск