

УДК 669.18.001.57

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛЕРОДА И КИСЛОРОДА ПО ВЫСОТЕ СЛОЯ МЕТАЛЛА ПРИ БАРБОТАЖЕ В СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ АГРЕГАТАХ

*Камкина Л.В., Яковлев Ю.Н., Стомба Я.В., Стогний Ю.Д.
Днепропетровск, Национальная металлургическая академия Украины*

Аннотация. 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.

Анотація. Як при окислювальній плавці, так і при вакуумному знеуглецюванні максимальні різниці концентрацій у верхніх і нижніх шарах складають для кисню близько 12 % відносних, для вуглецю – близько 0,2 % відносних.

Annotation. Both at the oxidizing melting and at a vacuum decarbonating the maximal differences of concentrations in overhead and lower layers make for oxygen about 12 % relative, for a carbon – about 0,2 % relative.

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 СО в прямом направлении, что обеспечивается снижением парциального давления СО, уменьшением остаточного давления газовой фазы над металлом или продувкой металла инертным газом.

Окисление углерода в металле во всех сталеплавильных процессах сопровождается образованием пузырей СО, 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. 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

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

где ρ_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 СО его масса возрастает и объем V является функцией давления столба металла и приращения массы за счет реакции между углеродом 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

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

где ν – 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

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

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/(м².час) кислорода; для процесса вакуумного обезуглероживания - вакуумирование в ковше. Для совмещения на одном графике различных процессов на оси абсцисс отложено относительное время $T_{OT} = \tau / T_P$ (τ – текущее время процесса, T_P – продолжительность процесса обезуглероживания).

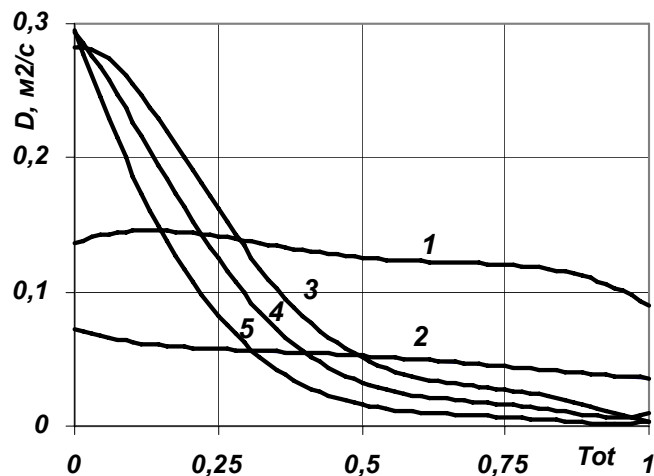


Рис. 1. Изменение коэффициента эффективной диффузии по ходу процесса: подовая плавка – глубина ванны: 1 – 1 м, 2 – 0,5 м; вакуумирование – глубина ковша; 3 – 3 м, 4 – 2 м, 5 – 1 м.

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 подовых 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.

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. 3.3) имеет более сложный характер. 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 расходования 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.

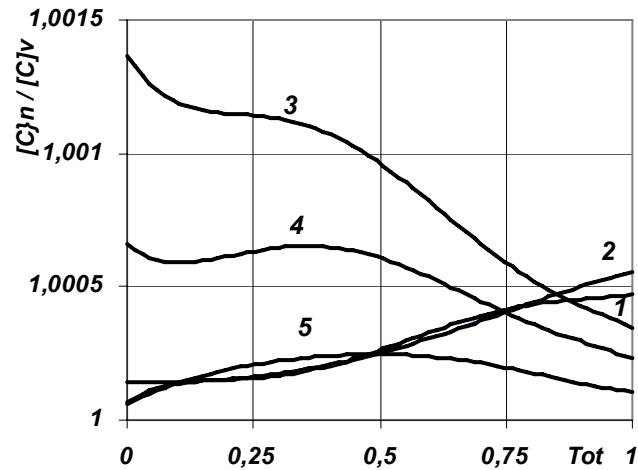


Рис. 2. Отношение концентраций углерода внизу и вверху ванны по ходу процесса. Обозначения, как на рис.1

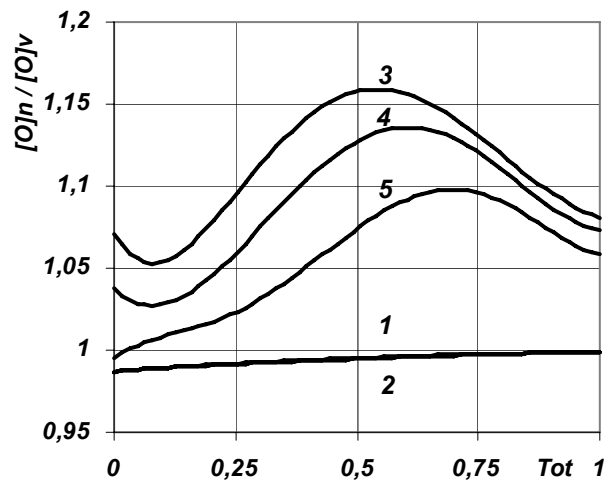


Рис. 3. Отношение концентраций углерода внизу и вверху ванны по ходу процесса. Обозначения, как на рис.1

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.

Литература

1. Явойский В.И. Газы в ваннах сталеплавильных печей. – М.: Металлургиздат. – 1952. 246 с.
2. Кочо В. С. Кипение жидкого металла в ванне сталеплавильной печи // Сталь. 1945. – 2 – 3. – с. 55–60.
3. Меджибожский М.Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов. Киев; Донецк: Вища школа. 1986. – 280 с.
4. Варенцов А. А., Капустин Е. А. О термодинамическом анализе процессов перемешивания расплавов // Изв. АН СССР. – Металлы. 1983, № 6, с. 23–32.
5. 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.
6. Яковлев Ю.Н., Величко А. Г., Камкина Л.В. Математическая модель окисления углерода при вакуумной обработке стали в ковшах. // Вестник Приазовского государственного технического университета. – Вып. № 10 – 2000. Мариуполь. – ПГТУ, 2000. – С. 45 – 52.
7. Иванов А. В., Яковлев Ю. Н. Моделирование процессов перемешивания в ваннах металлургических агрегатов при барботаже // Теория и практика металлургии. 1998, № 2, с. 12–15.