

В.И.Елисеев, А.С.Булахтин, Л.П.Курилова, А.Ф.Шевченко

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДИНАМИКИ И РАСТВОРЕНИЯ ПАРОМАГНИЕВЫХ ПУЗЫРЕЙ, ВСПЛЫВАЮЩИХ В РАСПЛАВЕ ЧУГУНА

Разработана расчетная модель движения и физико-химического взаимодействия газомagneвных пузырей с расплавом чугуна. Проведенные расчеты показали, что в реальных условиях рафинирования чугуна при содержании серы в расплаве вплоть до 0,040%, начальном радиусе пузыря вплоть до 6,5 мм и глубине расплава 2,5 м и более происходит полное усвоение паров магния чугуном.

Современное состояние вопроса. Процесс десульфурации чугуна магнием включает в себя несколько звеньев: образование паромagneвных пузырей, растворение магния, химическое взаимодействие магния с серой (собственно десульфурация), эвакуация продуктов реакции и прочее. Эффективность десульфурации определяется полнотой усвоения паров магния из пузыря. Для максимально возможного использования магния продолжительность всплывания пузыря должна быть достаточной для завершения массообменных процессов, протекающих в системе газовая фаза пузыря – расплав чугуна. Более медленными по сравнению с химическим взаимодействием являются процессы диффузионного растворения магния, что обуславливает увеличение продолжительности растворения магния и, следовательно, снижение скорости растворения пузыря. Кроме того, если допустить, что блокировка межфазной поверхности системы газ – расплав чугуна поверхностно активной серой препятствует диффузии магния вглубь расплава [1], то возможно ожидать снижения скорости растворения пузыря с увеличением содержания серы.

Ранее в работе [2] были выполнены расчетно-аналитические исследования всплывания и растворения паромagneвного пузыря за счет более медленного процесса – диффузии магния из пузыря с учетом блокирующего действия серы. С этой целью была создана математическая модель, позволяющая рассчитать параметры движения и диффузионного массообмена паромagneвного пузыря для условий, приближенных к промышленным по составу газовой фазы пузыря (смесь паров магния и нейтрального – Ar или способного растворяться в металле – N₂ транспортирующего газа в соотношении реальных обработок чугуна 9 : 1), температуре (1300⁰C), глубине погружения фурмы (1,5–4,5 м), содержанию серы в чугуне (0,001–0,040%). Начальный радиус пузыря варьировали от 2,5 см до 6,5 см.

Расчеты показали, что в зависимости от содержания серы диффузионное растворение магния из 2^x-компонетного пузыря радиусом (r_p^0) 2,5–6,5 см происходит в течение 0,3–9 с. Полнота перехода паров магния в расплав зависит от размера пузыря и содержания серы в чугуне. Уменьшение

радиуса пузыря и концентрации серы в расплаве (её блокирующего действия) в сочетании с увеличением глубины погружения фурмы создает предпосылки для полного растворения магния в расплаве чугуна.

Методы и результаты исследования. На основе разработанной ранее [2] модели диффузионного растворения паромagneйного пузыря в настоящей работе создана более полная математическая модель, учитывающая, что убыль паров магния из пузыря происходит не только за счет диффузии магния, но и за счет химического взаимодействия магния с серой расплава.

Модель включает:

- систему уравнений, описывающую движение больших пузырей в жидкой маловязкой среде;
- уравнения диффузионного массопереноса основных компонентов процесса (магния, серы и азота как газа-носителя);
- термодинамические условия равновесия на фазовой границе пузыря с учетом блокирующего действия серы как поверхностно-активного компонента;
- кинетические уравнения, описывающие химическую реакцию взаимодействия растворенного магния с серой в расплавленном чугуне с учетом активностей компонентов.

Для расчетов применен математический аппарат теории пограничного слоя, который дает возможность рассмотрения сложных динамических задач с учетом различных физико-химических особенностей процесса. Полученная система состоит из уравнений обыкновенного типа и уравнений в частных производных, относящихся к уравнениям пограничного слоя. Уравнения переводятся в конечноразностную систему первого порядка по времени, в результате чего могут быть интегрированы. Нестационарные конечноразностные уравнения пограничного слоя решаются методом прогонки при соответствующих граничных условиях, учитывающих физические особенности процесса.

При составлении математической модели принят ряд допущений. Основным является условие, что скорость адсорбции значительно выше скоростей составляющих звеньев процесса (термодинамическое квазиравновесие на поверхности пузыря). Оценки скорости адсорбции простых молекул металлами, данные в [3], позволяют использовать это условие даже при протекании химических реакций. Математические постановки растворения газов с учетом химических реакций, данные в [4], также включают в себя термодинамические условия равновесия на фазовых поверхностях.

Другим важным упрощением является следующее условие. Вследствие того, что коэффициенты диффузии растворенных веществ в металле составляют величину 10^{-8} – 10^{-9} м²/с, числа Шмидта имеют порядок 10^2 – 10^3 . Это указывает на то, что толщина диффузионного пограничного слоя значительно меньше как радиуса пузыря, так и динамического пограничного

слоя. Это дает возможность пренебречь кривизной поверхности пузыря и рассматривать диффузионный пограничный слой на пластине. Примем также, что пузырь имеет шарообразную форму. Испарение частиц магния происходит практически мгновенно [5]. Кроме того, будем считать, что процесс перемешивания газа в пузыре идет со скоростью, превышающей диффузионный процесс в металле. Это дает возможность считать концентрации компонентов в пузыре однородными, т.е. не зависящими от пространственных координат. И, наконец, учитывая, что парциальное давление паров серы значительно меньше парциального давления паров магния, десорбцией серы с поверхности металла пренебрежем. Если теперь ввести систему координат s, n , где первая координата проходит по образующей пузыря от точки пересечения оси с поверхностью пузыря до противоположной точки, а вторая является нормалью к поверхности, то, используя теорию пограничного слоя [6], будем иметь следующие уравнения

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} = -\frac{dp}{\rho ds} + \frac{\partial}{\partial n} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial n} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial n} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + u \frac{\partial c_i}{\partial s} + v \frac{\partial c_i}{\partial n} = \frac{\partial}{\partial n} \left(D_i \frac{\partial c_i}{\partial n} \right) + M_i J_i, \quad (3)$$

где u, v - проекции скорости, соответствующие осям s, n ; t - время; p - давление; c_i - массовые концентрации компонентов в металле; ν - коэффициент кинематической вязкости; D_i - коэффициент диффузии i -го компонента, M_i - мольная масса, J_i - источник, возникший вследствие прохождения химической реакции. Примем еще следующие упрощающие условия: учитывая, что толщина диффузионного слоя значительно меньше динамического, будем считать, что в пределах диффузионного слоя $v = 0$ и $u = U = Const$. Последние условия значительно упрощают вычислительную сторону математической модели, но ни в коей мере не затрагивают принципиальную сторону вопроса. Отбрасывая два первых уравнения и вводя величины

$\tau = U_p t / R_p$, $\zeta = S / R_p$ и $N = \left(R_p U_p / D_* \right)^{1/2} n / R_p$ (U_p - скорость пузыря; R_p - эквивалентный радиус пузыря; D_* - характерный коэффициент диффузии), из (3) получим уравнение в безразмерном виде

$$\frac{\partial c_i}{\partial \tau} + \frac{U}{U_p} \frac{\partial c_i}{\partial \zeta} = \frac{D_i}{D_*} \frac{\partial}{\partial N} \left(\frac{\partial c_i}{\partial N} \right) + \frac{R_p}{U_p} M_i J_i \quad (4)$$

В случае, когда нет никаких химических реакций, $J_i = 0$. При рассмотрении десульфурации будем считать, что компонентами в растворе являются следующие вещества - Mg, S, MgS, N , где N - нейтральный компонент ($J_N = 0$), а магний и сера вступают во взаимодействие, образуя MgS по схеме [7]



Учитывая, что реакция (5) имеет прямое и обратное направление, величина

$$J_{Mg; S; MgS} = J = \bar{k} \left(\frac{\beta}{M_{Mg} M_S} \gamma_{Mg} \gamma_S c_{Mg} c_S - K \frac{\gamma_{MgS}}{M_{MgS}} c_{MgS} \right), \quad (6)$$

где \bar{k} - коэффициент, характеризующий скорость прямой химической реакции; K - константа равновесия реакции; γ_i - коэффициент активности. Таким образом, систему (4) можно переписать в виде следующей системы уравнений (в качестве D_* положим D_{Mg})

$$\frac{\partial c_N}{\partial \tau} + \frac{U}{U_p} \frac{\partial c_N}{\partial \zeta} = \frac{D_N}{D_{Mg}} \frac{\partial}{\partial N} \left(\frac{\partial c_N}{\partial N} \right), \quad (7)$$

$$\frac{\partial c_{Mg}}{\partial \tau} + \frac{U}{U_p} \frac{\partial c_{Mg}}{\partial \zeta} = \frac{\partial}{\partial N} \left(\frac{\partial c_{Mg}}{\partial N} \right) - \frac{R_p}{U_p} M_{Mg} J, \quad (8)$$

$$\frac{\partial c_S}{\partial \tau} + \frac{U}{U_p} \frac{\partial c_S}{\partial \zeta} = \frac{D_S}{D_{Mg}} \frac{\partial}{\partial N} \left(\frac{\partial c_S}{\partial N} \right) - \frac{R_p}{U_p} M_S J, \quad (9)$$

$$\frac{\partial c_{MgS}}{\partial \tau} + \frac{U}{U_p} \frac{\partial c_{MgS}}{\partial \zeta} = \frac{D_{MgS}}{D_{Mg}} \frac{\partial}{\partial N} \left(\frac{\partial c_{MgS}}{\partial N} \right) + \frac{R_p}{U_p} M_{MgS} J, \quad (10)$$

где уравнения (7)–(10) описывают массообмен соответственно азота, магния, серы и MgS в пограничном слое.

Выписанная система уравнений (7)–(10) совместно с (6) определяет диффузионно-кинетический процесс десульфурации металла магнием в окрестности пузыря.

Для расчета параметров необходимо выписать граничные условия и определить область решения. Так как эта система относится к задачам пограничного слоя, то для численной реализации можно ввести его толщину, которая определяется в соответствии с известными процедурами

[8]. Однако можно поступить несколько проще - заранее задать некоторую область постоянной ширины и следить, чтобы в конце ее параметры плавно переходили к своим значениям на верхней границе этой области. Для этого случая граничные условия запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} \text{при } \zeta = 0 \quad c_{N_2}(\tau, N) = c_{N_2}^0 - Const, \quad c_S(\tau, N) = c_S^0 - Const, \\ c_{Mg}(\tau, N) = c_{Mg}^0 - Const, \quad c_{MgS}(\tau, N) = c_{MgS}^0 - Const; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{при } N = h \quad (h - \text{ширина области}) \quad c_{N_2}(\tau, \zeta) = c_{N_2}^0, \\ c_S(\tau, \zeta) = c_S^0, \quad c_{Mg}(\tau, \zeta) = c_{Mg}^0, \quad c_{MgS}(\tau, \zeta) = c_{MgS}^0, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{при } N = 0 \quad (\text{поверхность пузыря}) \quad c_N(\tau, \zeta) = c_{N_2}^*,$$

$$c_{Mg}(\tau, \zeta) = c_{Mg}^*, \quad \frac{\partial c_S}{\partial N} = 0, \quad \frac{\partial c_{MgS}}{\partial N} = 0 \quad (13)$$

Здесь величины c_N^0 , c_S^0 , c_{Mg}^0 , c_{MgS}^0 представляют собой значения концентрации компонентов соответствующих веществ, находящихся в металле. В начальной стадии процесса $c_N^0 = c_{Mg}^0 = c_{MgS}^0 = 0$, к концу процесса они могут иметь не нулевые значения. Величины c_N^* и c_{Mg}^* определяются из термодинамических условий равновесия на поверхности всплывающего пузыря, которые устанавливают соответствующие зависимости между парциальным давлением соответствующего компонента в пузыре и концентрацией этих компонентов в металле. Для магния и азота эти зависимости приведены в [7] и [9] и имеют вид

$$\lg(100c_{Mg}^*) = \frac{7000}{T_a} - 5.1 + \lg \frac{p_{Mg}}{10^5}, \quad (14)$$

$$\lg(100c_{N_2}^*) = -\frac{850}{T_p} - 0.905 + \lg \frac{p_{N_2}}{10^5}. \quad (15)$$

где p_{Mg} , p_{N_2} - парциальные давления паров магния в пузыре и азота c_{Mg}^* , $c_{N_2}^*$ - массовые концентрации магния и азота в металле, T_a - температура металла на поверхности пузыря ($^{\circ}\text{K}$).

В ряде работ, например [10], отмечается, что сера как поверхностно-активный компонент оказывает блокирующее воздействие на проникновение магния в металл, которое учитывается введением дополнительного коэффициента $\kappa = \frac{\theta_M}{\theta_{CH}}$ (θ_M - доля адсорбционных мест магния при

наличии серы, θ_{CH} - доля адсорбционных мест магния без серы), при этом $\frac{c_{Mg}^S}{c_{Mg}} = k$ (c_{Mg}^S - концентрация магния в металле на поверхности пузыря при наличии серы). Сам коэффициент определяется из выражения [10]

$$k = \frac{10^2 b_{Mg} c_{Mg}^S}{\theta_{CH} (1 + 10^2 b_{Mg} c_{Mg}^S + 10^2 b_S c_S)}, \quad (16)$$

где $b_{Mg} = 6,9$, $b_S = 38,5$, $\theta_{CH} = 0,482$. Для общности постановки задачи эффект блокировки несомненно представляет интерес, и поэтому дальше концентрация c_{Mg}^* определяется из выписанного условия (14) с учетом коэффициента k .

Как видно из уравнения (6), для расчета необходимо знать кинетические коэффициенты \vec{k} , K и γ_j . В настоящее время в литературе значение \vec{k} не освещено. Из теории растворов известно, что скорость химической реакции может быть представлена для различных веществ широким спектром значений. В данной работе для определения влияния химической реакции используем некоторое среднее значение этого параметра $\vec{k} = 10^5 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{моль})$. Константу равновесия реакции (5) принимаем равной $K = 10^{-6}$ [11]. Коэффициенты активности серы и магния принимаем в виде зависимостей, представленных в [12].

Выписанная система уравнений описывает массообмен в диффузионном пограничном слое.

Учитывая, что пузырь движется в расплавленном металле, необходимо к этим уравнениям добавить уравнения движения. Движению пузырей в жидкости посвящено довольно много работ, например [13,14]. Широкую известность в практических расчетах получила формула для скорости большого пузыря, выведенная в [14]

$$\frac{dX_p}{dt} = U_p = \left[g R_p \frac{\rho_m - \rho_p}{\rho_m + \rho_p} + \frac{\sigma}{R_p (\rho_m + \rho_p)} \right]^{1/2}, \quad (17)$$

где X_p - путь пузыря; ρ_m , ρ_p - плотности соответственно металла и газа в пузыре; σ - коэффициент поверхностного натяжения; g - ускорение свободно падающего тела.

Учитывая, что коэффициент диффузии в газе значительно больше коэффициента диффузии в расплаве, а также что движение газа внутри пу-

зря довольно интенсивное вследствие постоянных колебаний поверхности, примем все параметры, определяющие массообмен в пузыре, однородными. В этом случае выписанная система уравнений дополняется следующими простыми выражениями

$$m_p = \frac{4}{3} \pi \rho_p R_p^3, \quad (18)$$

$$m_p = m_{\text{Mg}} + m_{\text{N}_2}, \quad (19)$$

$$p_p = \rho_p R_{\Sigma} T_p, \quad (20)$$

$$R_{\Sigma} = R \left(\frac{c_{\text{Mg}}}{M_{\text{Mg}}} + \frac{c_{\text{N}_2}}{M_{\text{N}_2}} \right), \quad (21)$$

$$\frac{dm_{\text{Mg}}}{dt} = g_{\text{Mg}}, \quad \frac{dm_{\text{N}_2}}{dt} = g_{\text{N}_2}, \quad (22)$$

где m_{Mg} , m_{N_2} , m_p - соответственно масса паров магния в пузыре, масса азота и полная масса пузыря; p_p - давление в пузыре; ρ_p - плотность газа в пузыре; T_p - температура газа в пузыре, которую принимаем равной температуре металла; R - универсальная газовая постоянная; M_{Mg} , M_{N_2} - молярные массы магния и азота; g_{Mg} , g_{N_2} - массовые потоки магния и азота на поверхности пузыря.

Система уравнений (7)–(10) может быть решена с помощью численных методов, предназначенных для решения параболических уравнений.

Для проверки нашей постановки задачи и ее решения были проведены расчеты более простой задачи – задачи о массообмене в пограничном слое при постоянных концентрациях на поверхности без химических реакций. Расчеты проводились по выписанной нами общей схеме, по известному автомодельному методу [6] и по формуле Хигби [13]. Ниже приведены значения коэффициента массообмена, полученные из этих расчетов.

| По предложенной общей схеме | По автомодельному методу [6] | По формуле Хигби [13] |
|-----------------------------|------------------------------|-----------------------|
| $2,23 \cdot 10^{-4}$ | $2,20 \cdot 10^{-4}$ | $2,14 \cdot 10^{-4}$ |

Видно, что результаты этих расчетов довольно неплохо согласуются, что говорит о правильности численного решения и (что более важно, учитывая широкое использование формулы Хигби для расчетов массообмена в металлургических процессах) о правдоподобии общей постановки задачи.

Изложение основных материалов исследования. По разработанной и представленной выше математической модели движения и диффузионно-кинетического массообмена паромagneйного пузыря с расплавом чугуна с учетом химического взаимодействия магния с серой выполнены расчеты значений следующих параметров:

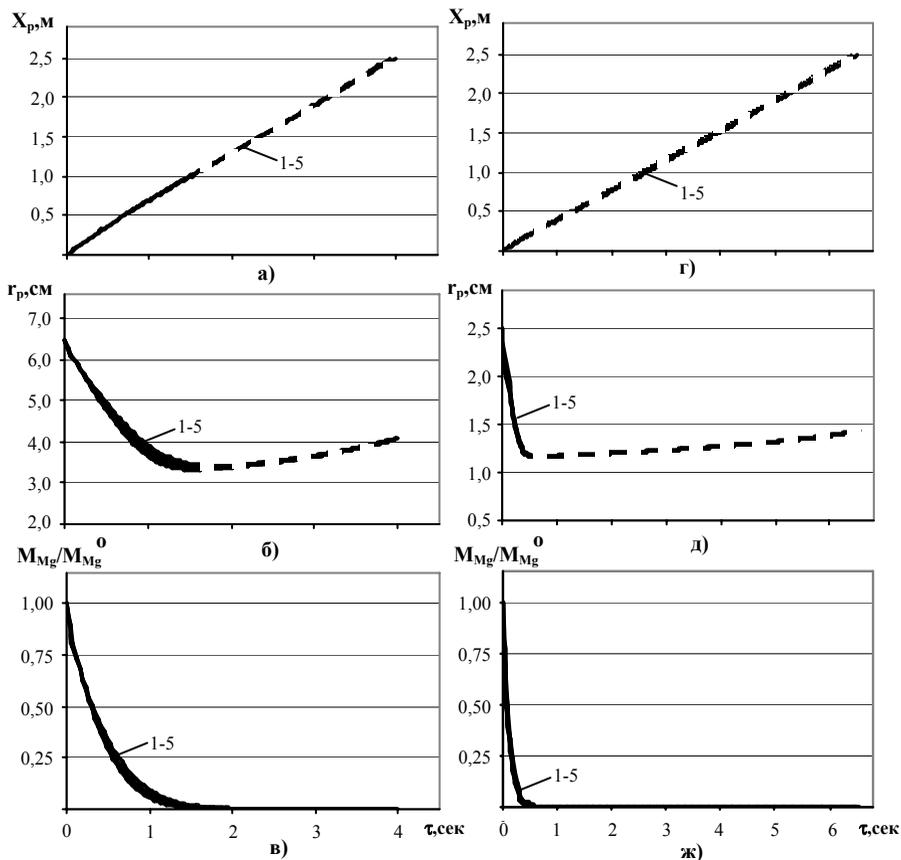
- продолжительность нахождения пузыря в расплаве;
- время ухода паров магния из пузыря;
- глубина ванны расплава, на которой заканчивается растворение паров магния;
- изменение размера пузыря и его скорости при всплывании из расплава;
- характеристики движения и массообмена паромagneйного пузыря в зависимости от а) содержания серы в расплаве;
- б) размера пузыря;
- в) глубины расплава, на которой образуется пузырь.

Исходные условия для расчета приняты в пределах расчета предыдущей модели, учитывающей растворение пузыря только за счет диффузионного перехода магния в расплав: начальный радиус пузыря варьировали в пределах от 2,5 см до 6,5 см; глубину ванны от места образования пузыря до поверхности расплава (глубина погружения фурмы) изменяли от 2,0 до 3,5 м; содержание серы в чугуне принимали равным 0,002–0,040%; температура расплава 1300°C. Расчет выполняли для единичных 2^х-компонентных пузырей, состоящих из паров магния (87%) и инжетирующего газа азота (13%).

Результаты расчета динамических характеристик всплывающих пузырей и изменение относительной массы пара магния в пузырях, поднимающихся из глубины расплава, например, 2,5 м (характерная глубина погружения фурмы при промышленной десульфурации чугуна) представлены на рис.1. Концентрация серы в чугуне принята равной 0,002%, 0,005%, 0,010%, 0,020%, 0,040%. На рис.1,а,г показана расчетная длина пути (X_p) всплывающих пузырей с начальным радиусом (r_p^0) 6,5 см и 2,5 см, соответственно; на рис.1,б,д – кривая изменения радиуса пузырей по мере подъема в расплаве чугуна; на рис.1,в,ж – изменение относительной массы паров магния (M_{Mg}/M_{Mg}^0) в пузырях во время всплывания (M_{Mg}^0 – начальная концентрация пара магния, принятая за единицу; M_{Mg} – концентрация магния в текущий момент времени).

На рис.2 показано изменение параметров движения и растворения 2^х-компонентного пузыря, всплывающего из глубины 3,5 м. На этом рисунке кривые ограничены окончанием ухода паров магния из пузыря. Как видно из рис.1, изменение размера 2^х-компонентного (пар магния + азот) пузыря в процессе всплывания характеризуется общей для принятых условий закономерностью: вначале подъема растворяются пары магния и азот

(сплошная линия кривой), вследствие чего объем пузыря быстро уменьшается (ниспадающий участок кривой, рис. 1,б,д); после полного ухода



А – Начальный радиус пузыря 6,5 см Б – Начальный радиус пузыря 2,5 см

Глубина расплава 2,5 м

————— пузырь с парами магния и азотом;
 - - - - - пузырь с азотом.

паров магния из пузыря (минимум на кривой, пунктирная линия) продолжается возможное растворение только азота вплоть до момента выхода пузыря на поверхность ванны.

Рис. 1. Изменение длины пройденного пути (а, г), радиуса пузыря (б, д) и относительной массы паров магния в пузыре (в, ж) от времени движения при всплывании пузыря из глубины расплава 2,5 м (с учетом расхода магния на диффузию и

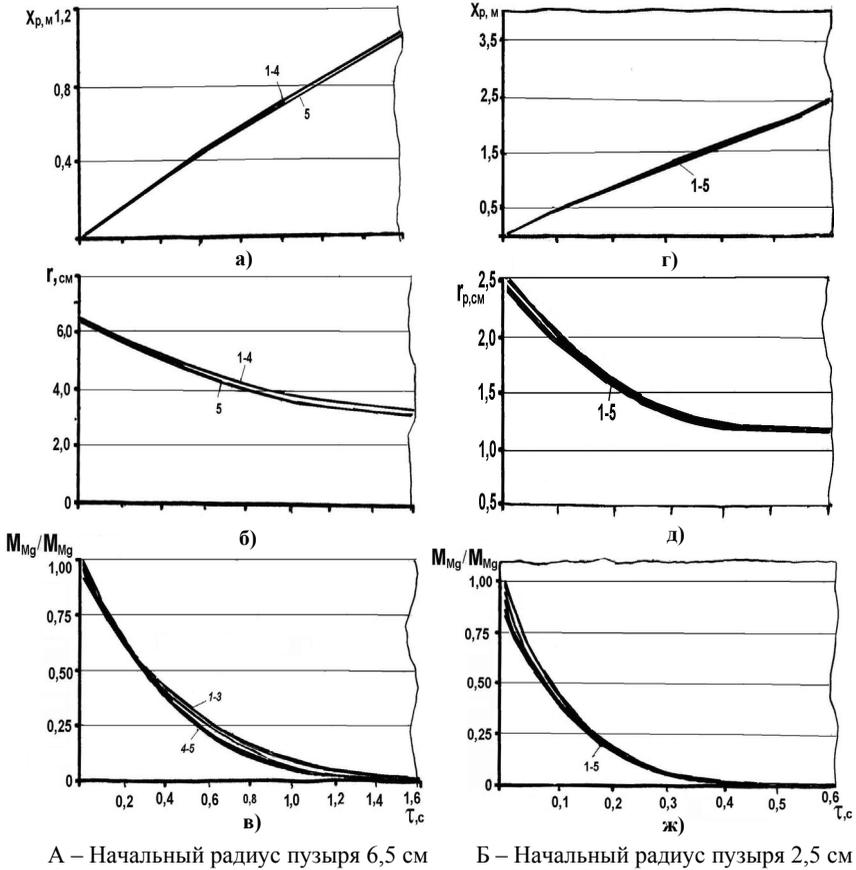
химическое взаимодействие с серой). Содержание серы в чугуна: 1 – 0,002%; 2 – 0,005%; 3 – 0,010%; 4 – 0,020%; 5 – 0,040%.

Определяющим для десульфурации чугуна является первый этап растворения 2^x -компонентного пузыря – выход паров магния в расплав. Расчет показывает, что вследствие хорошей растворимости и высокого сродства к сере магний довольно быстро – за 0,6 – 1,6 с усваивается расплавом (рис.1). В наибольшей степени скорость перехода магния из газовой фазы (пузыря) в жидкий чугун зависит от размера пузыря. Чем меньше первоначальный размер пузыря, тем меньше продолжительность ухода паров магния в расплав, но больше общее время всплывания пузыря из расплава (рис.3). Например, для интервала содержания серы в чугуна 0,002–0,040% и глубины расплава 2,5 м время полного ухода пара магния из пузыря радиусом 2,5 см составляет 0,6 с при общей длительности всплывания пузыря к поверхности ванны 6,5 с. Из пузыря радиусом 6,5 см магний уходит в расплав медленнее – за 1,6 с, но пузырь всплывает быстрее – за 3,7 с.

Из диаграмм рис.1 и 2 следует также, что полное расходование магния из пузыря завершиться через 0,6 – 1,6 с всплывания пузыря в чугуна, что соответствует 0,25 – 1,1 м движения пузыря в расплаве глубиной 2,5 м, т.е. на первых 7–30% пути всплывания пузыря.

Скорость всплывания пузырей зависит от их размера и возрастает с увеличением радиуса пузыря (рис.4). Причем, для всех принятых в расчет размеров 2^x -компонентных пузырей характерна переменная скорость их всплывания. Как видно из рис.4, величина её резко снижается по мере уменьшения количества магния в пузыре (с 0,80 м/с до 0,58 м/с, например, для $r_p^0 = 6,5$ см), затем после полного ухода магния незначительно увеличивается на дальнейшем пути подъема пузыря. Расчет скорости всплывания в металле группы нерастворяющихся пузырей радиусом 5–10 см, выполненный авторами по формуле Маленкова И.Г., показал близкий результат – 0,7–1,0 м/с [15].

Полученные расчетные значения величины пузыря и концентрации в нем магния позволяют ориентировочно определить зону ковша по высоте, где происходит преимущественный выход паров магния в расплав из пузырей радиусом 2,5–6,5 см. На рис.5 показано изменение начального радиуса пузыря $r_p^0 = 2,5$ см (а) и относительной массы паров магния (M_{Mg} / M_{Mg}^0) в пузыре (б) при всплывании из глубины расплава 2,5 м. Величина пройденного пузырем пути от места образования обозначена X , высота слоя металла над пузырем – h (расстояние от пузыря до поверхности расплава), глубина расплава (глубина погружения фурмы) – h_{max} .



Глубина расплава 3,5 м

Рис. 2. Изменение величины пройденного пути (а,г), радиуса пузыря (б,д) и относительной массы паров магния в пузыре (в,ж) от времени при всплывании пузыря из глубины расплава 3,5 м (с учетом расходования магния на диффузию и химическое взаимодействие с серой). Содержание серы в чугуна: 1 – 0,002%; 2 – 0,005%; 3 – 0,010%; 4 – 0,020%; 5 – 0,040%

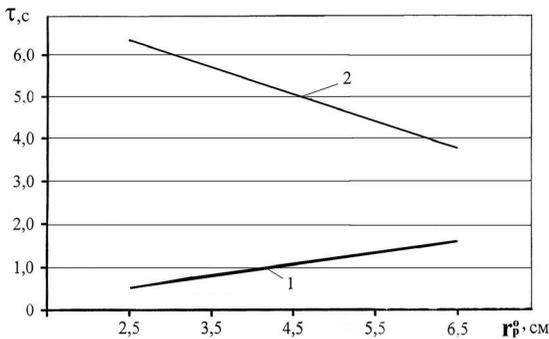


Рис. 3. Зависимость продолжительности выхода паров магния из пузыря (1) и общей продолжительности всплывания пузыря (Mg+N₂) (2) от начального размера пузыря. Глубина расплава – 2,5 м

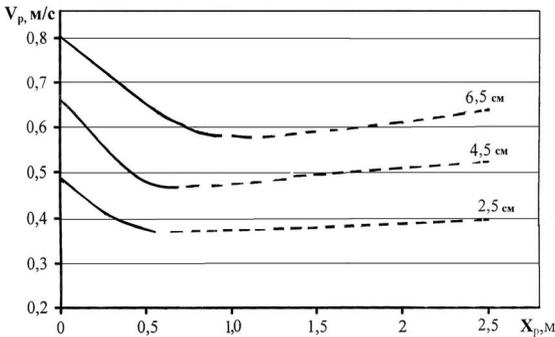


Рис. 4. Изменение скорости пузыря (V_p) при всплывании из глубины (X_p) 2,5 м. Цифры у кривых – первоначальный радиус пузыря (r_p^0)

По уменьшению размера пузыря и массы магния при подъеме пузыря из глубины (h_{\max}) 2,5 м видно

(рис.5, а, б), что более крупные пузыри ($r_p^0 = 6,5$ см) поднимаются с магнием почти до середины ванны (далее всплывает пузырь без магния – только с азотом). Преимущественное растворение магния – 95% от его количества в пузыре, происходит на глубине $h=1,7$ м. Из меньшего пузыря ($r_p^0 = 2,5$ см) растворение основной массы магния заканчивается на большей глубине – $h=2,35$ м, т.е. в начале пути всплывания. Как видно, уменьшение размера пузыря и увеличение глубины погружения фурмы смещает зону растворения магния в придонную область ковша, что создает более благоприятные условия для протекания процесса десульфурации.

Настоящая модель расчета массообмена паромagneйного пузыря с расплавом чугуна дает возможность учесть основной расход магния из пузыря – расход на взаимодействие магния с серой расплава. Выполненный расчет показал, что продолжительность растворения магния из пузыря радиусом $r_p^0 = 2,5–6,5$ см практически не зависит от концентрации серы в чугуне в пределах её содержания 0,002–0,040%. Это видно из рис.1, 2, на которых кривые, характеризующие временную зависимость массопереноса магния в расплав от содержания серы (0,002–0,040%), сливаются.

Напротив, как было показано ранее [2], при растворении пузыря только за счет диффузии магния (без учета химического взаимодействия с серой) сера, оказывая блокирующее действие, значительно замедляет выход паров магния в расплав. Так, в жидком чугуне с супернизким содержанием серы (0,002% S) пары магния полностью переходят в расплав; в чугуне с содержанием серы 0,040% магний из пузыря успевает усвоиться лишь на 39%, т.е. при диффузионном растворении магния сера может ограничивать полноту усвоения магния из пузыря.

Убыль магния из пузыря за счет диффузии и химического взаимодействия с серой расплава в пределах концентрации серы 0,002-0,040% составляет 100% (рис.1, 2), т.е. магний может успеть полностью усвоиться чугуном до выхода пузыря на поверхность расплава.

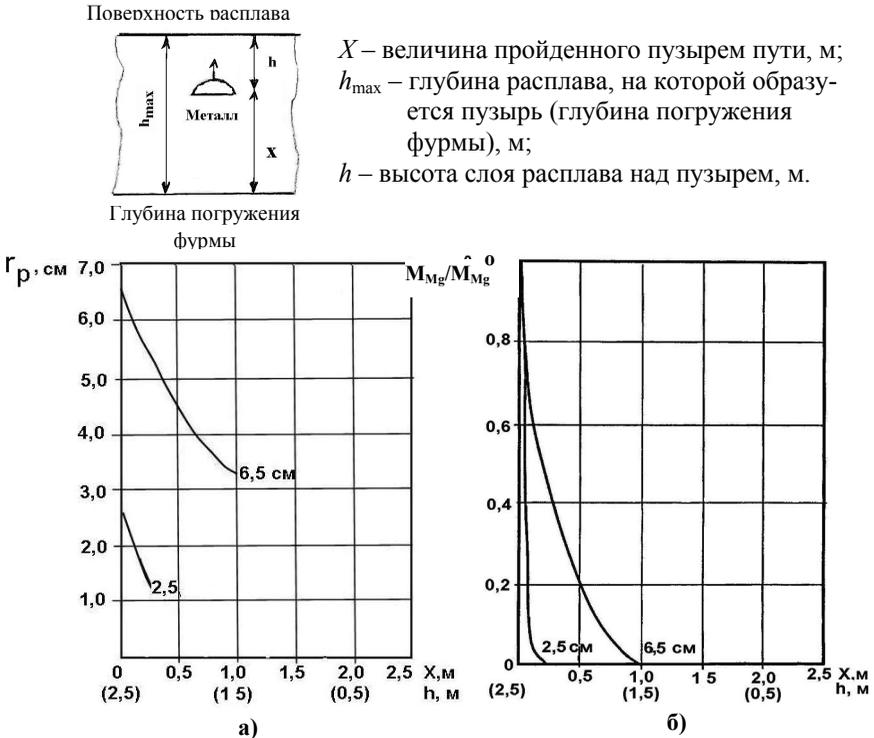


Рис.5. Изменение радиуса пузыря (а) и относительной массы паров магния в пузыре (б) при всплывании из глубины расплава (h_{\max}) 2,5 м

Учитывая полученные результаты, можно прийти к заключению, что для принятых условий расчета блокирующий эффект серы, уменьшающий диффузионный массопоток магния через межфазную границу газ пузыря – расплав чугуна, компенсируется высокой скоростью химического взаимодействия магния с серой расплава, вследствие чего может происходить полная массопередача магния из пузыря в расплав.

Заключение. Таким образом, в данной работе развиты представления о механизме протекания тепло- массообменных процессов при вводе диспергированного магния в расплав чугуна. Показано, что за счет одновременно протекающих процессов растворения паров магния в чугуне, диффузии магния в расплаве и химического взаимодействия магния с серой (в пределах её концентрации 0,002-0,040%) уход магния из пузыря в расплав составляет 100%, т.е. магний может быть полностью усвоен чугуном на пути всплывания двухкомпонентных (парогазовых) пузырей в слое расплава в ковше. Без учета химического взаимодействия магния с серой чугуна имеются отдельные условия, когда при высоких содержаниях серы

(до 0,040%) и небольшой глубине ванны полнота усвоения магния может снижаться со 100% до 40%.

В реальных условиях рафинирования чугуна в большегрузных ковшах (свыше 140 т) при содержании серы в расплаве вплоть до 0,040%, начальном условном радиусе пузыря вплоть до 6,5 мм и глубине расплава 2,5 м и более полное усвоение магния чугуном может быть завершено на первом этапе всплывания на глубине более 1,5 м (от поверхности расплава).

1. *Зборщик А.М., Пилюшенко В.Л., Лифенко Н.Т.* Кинетические особенности реакций при глубокой десульфурации чугуна магнием // *Сталь* – 1987. – № 7. – С.22-26.
2. *Исследование влияния условий инжектирования магниесодержащих реагентов в жидкий чугун на механизм взаимодействия магния с расплавом и получение особо чистого по сере чугуна (0,001-0,003%) при десульфурации в заливочных ковшах.* Отчет ИЧМ. № госрегистрации 0103U007231. // *Днепропетровск, 2005.* – 253 с.
3. *Данквертс П.В.* Газо-жидкостные реакции. // М.: Химия, 1973. – 296 с.
4. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. // М.: Наука, 1969. – 742 с.
5. *Ключник М.Н., Воронова Н.А.* Поведение частиц магния в расплаве при внедоменной десульфурации чугуна // *Изв. Вузов. Черная металлургия.* – 1975. – № 10. – С. 132–136.
6. *Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А.* Численное моделирование процессов тепло- и массопереноса. // М.: Наука, 1984. – 288 с.
7. *Воронова Н.А.* Десульфурация чугуна магнием. // М.: Металлургия, 1980. – 239 с.
8. *Линчевский Б.В.* Термодинамика и кинетика взаимодействия газов с жидкими металлами. // М.: Металлургия, 1986. – 222 с.
9. *Особенности математического описания процесса модифицирования чугуна магнием.* / А.М.Зборщик и др. // *Изв. Вузов. Черная металлургия.* – 1985. – №2. – С. 5–9.
10. *Доменный чугун с шаровидным графитом для крупных отливок.* / А.М.Зборщик, В.А.Курганов, Ю.Б.Бычков и др. // М.: Машиностроение, 1995. – 128с.
11. *Чичкарев Е.А., Троцан А.И., Алексеева В.А.* Оценка параметров взаимодействия для условий десульфурации жидкого чугуна магнием // *Процессы литья* – 2003. – № 1. – С.92-96.
12. *Туркдоган Е.Т.* Физическая химия высокотемпературных процессов. // М.: Металлургия, 1985. – 344 с.
13. *Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л.* Теория продувки сталеплавильной ванны. // М.: Металлургия, 1974. – 496 с.
14. *Маленков И.Г.* О движении больших пузырей, всплывающих в жидкости. // *ЖПМТФ.* – 1968. – № 6. – С. 130–134.
15. *Бердников В.И., Левин А.М.* О скорости всплывания газовых пузырей в металлических и шлаковых расплавах // *Изв. Вузов. Черная металлургия.* – 1977. – № 12. – С. 24–27.

Статья рекомендована к печати докт.техн.наук А.С.Вергуном