

УДК 669.18

**В. Б. Охотский**

Государственная металлургическая академия, Днепропетровск

## ПАРОФАЗНАЯ ДЕСУЛЬФУРАЦИЯ МЕТАЛЛА. ТЕХНОЛОГИЯ (Сообщение 3)\*

*Описаны гидродинамические и массообменные процессы при десульфурации металла магнием и кальцием.*

**Ключевые слова:** чугуны, сталь, десульфурация, магний, кальций.

*Описано гідродинамічні та масообмінні процеси при десульфурції металу магнієм та кальцієм.*

**Ключові слова:** чавун, сталь, десульфурція, магній, кальцій.

*The parameters of technology of desulphurizing of cast-iron magnesium are certain and became a calcium.*

**Keywords:** cast-iron, steel, desulphurizing, magnesium, calcium.

**А**нализ гидродинамических процессов при десульфурации чугуна магнием и стали кальцием [1], а также и закономерностей усвоения реагентов [2] позволяет прогнозировать параметры технологии парофазной десульфурации металла.

### *Состояние вопроса*

Анализ литературных данных показывает, что параметры технологии для практически одинаковых условий значительно изменяются без какого-либо обоснования. Размер частиц  $d_p$  магния и силикокальция может изменяться на два порядка величины, а диаметр сопла фурмы – в несколько раз. Значительные по масштабам гидродинамические эффекты, вызванные интенсивным газовыделением, заставляют уменьшать вместимость ковшей, причем эмпирическим путем. Известны работы, которые прогнозируют длину пути порошковой проволоки (ПП) до ее разрушения в стали, но отсутствуют в чугуне. Необходима дальнейшая работа по аналитическим обобщениям экспериментальных данных.

### *Всплески*

При вдувании газа в металл образуется зона взаимодействия (пузырь) размера  $D$ , зависящая от расхода газа через одно сопло  $q$  [3], который всплывает со скоростью  $u = (gD/2)^{1/2}$ , где  $g$  – гравитационное ускорение. Если пузырь такого размера выходит на поверхность ванны металла, то образуется бурун, растущий по высоте

---

\*Сообщение 2. (Усвоение реагента) опубликовано в журнале «Процессы литья». – 2013. – № 2. – С. 3-8.

$\Delta H_{\delta}$  в режиме волн ускорения, теория которых изложена в работе [4]. Используя ее положения, получим

$$\Delta H_{\delta} = 2C_D \cos^2 \theta u^2 (T/273)^{2/5} \pi n g, \quad (1)$$

где  $C_D$  – коэффициент сопротивления  $\approx 1$  [4];  $\theta$  – угол между осью потока и вертикалью;  $n$  – отношение давлений в скачке уплотнения;  $T_1$  – температура металла.

Если первичный пузырь дробится [1], то возникает барботаж вторичных пузырей, вызывающий движение металла в зоне барботажа со скоростью  $W_1$ , зависящей от  $q$  и глубины погружения сопла в ванну  $h$  [3], и высота буруна будет

$$\Delta H_{\delta} = 2C_D \cos^2 \theta k_w q^{2/3} (T_1/273)^{2/5} / \pi n g^{1/3} h^{2/3}, \quad (2)$$

где  $k_w$  – коэффициент пропорциональности.

На рис. 1 рассчитанные по уравнениям (1) и (2) линии I сопоставлены с экс-

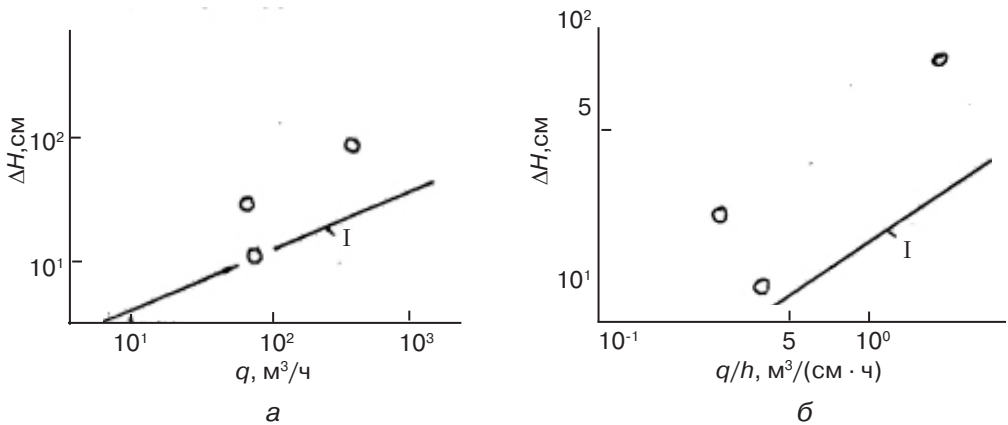


Рис. 1. Высота буруна от первичных (а) и вторичных (б) пузырей

периментальными данными (точки) [5-6], которые расположены на уровне и выше теоретических. Последнее является результатом всплесков жидких фаз, растущих как волны ускорения  $\lambda_a = \pi h_s$ , ( $h_s$  – высота всплеска) в течение времени прохождения волной ускорения по диаметру образующегося пузыря. Используя теорию волн ускорения [4], получим, что высота всплеска, отсчитываемая от сопла фурмы, будет

$$h_s = (\pi \beta_a h^{1/2} D / C_D \cos^2 \theta)^{2/3}, \quad (3)$$

где  $\beta_a \approx 1$  [4].

*Дутьевой режим*

При погружении сопла фурмы на глубину  $h$  высота той части всплеска, которая выходит за пределы ванны металла,  $\Delta h_s = (h_s - h)$ . На рис. 2 высота свободного борта ковша  $\Delta H_{fb}$ , приведенная в литературных источниках, сопоставлена с величиной  $\Delta h_s$ . В большинстве случаев она расположена выше линии равных значений I, что позволяет на практике избегать выплесков из ковша металла и шлака. Коэффициент использования вместимости ковша при продувке чугуна порошком магния [5] колеблется в широком диапазоне (0,55-0,87), который может быть

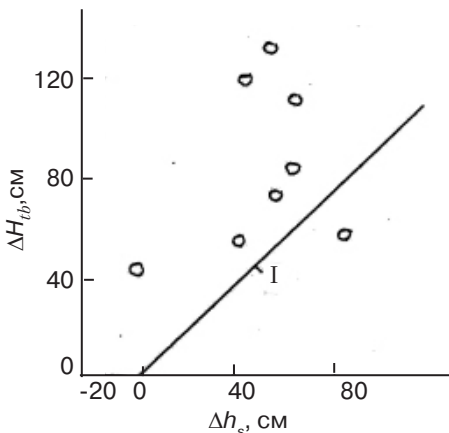


Рис. 2. Высота всплесков над уровнем ванны

сужен при прогнозировании необходимой и достаточной величины  $\Delta H_{ib}$ .

При погружении фурмы на глубину  $h = h_s$  всплески не выходят за пределы ванны. На рис. 3 это условие представлено линией I для продувки стали в ковше инертными оксидными порошками в потоке аргона через одно- и более каналные фурмы. Область экспериментальных данных (ограничены пунктирными линиями) качественно и количественно отвечает этой зависимости.

При продувке металла порошками магния и кальция вызываемое ими паробразование в несколько раз превосходит расход несущего газа и образование всплесков жидких фаз в первом приближении определяется массовым расходом десульфуратора  $G$ . Условие  $h = h_s$  может быть представлено зависимостями глубины погружения сопла фурмы  $h$  (см) от величины  $G$  (кг/мин) для магния

$$h = 90 G_1^{2/5}, \quad (4)$$

а для кальция

$$h = 54,8 G_2^{2/5}, \quad (5)$$

которые на рис. 4 представлены соответствующими линиями I и II, проходящими через область экспериментальных данных, ограниченную пунктирными линиями.

Одним из условий выбора дутьевого режима является расположение сопла фурмы на некотором расстоянии от днища ковша, что предотвращает его интенсивный износ. В связи с определенной зависимостью от массы металла  $M_1$  (т), диаметра ковша  $D_k = 0,54 M_1^{1/3}$  (м) и глубины ванны  $H_k = 0,65 M_1^{1/3}$ , а также от  $G$  десульфуратора диаметры образующихся зон взаимодействия (пузырей) магния  $D_1$  (м) и кальция  $D_2$  (м)

$$D_1 = 0,286 G_1; \quad (6)$$

$$D_2 = 0,254 G_2, \quad (7)$$

если  $G$  (кг/мин), то при

$$G_1 = 0,215 M_1^{5/6}; \quad (8)$$

$$G_2 = 0,290 M_1^{5/6} \quad (9)$$

выполняются оба условия: всплеск остается в пределах ванны ( $h_s \leq H_k$ ), а диаметр зоны взаимодействия  $D \leq H_k - h$ .

На рис. 5 для вдувания магния по выражению (8) и кальция – по (9) проведена

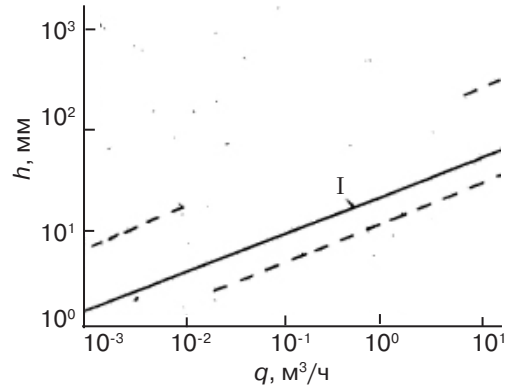


Рис. 3. Условия появления всплесков над уровнем ванны при десульфурующей продувке оксидными реагентами

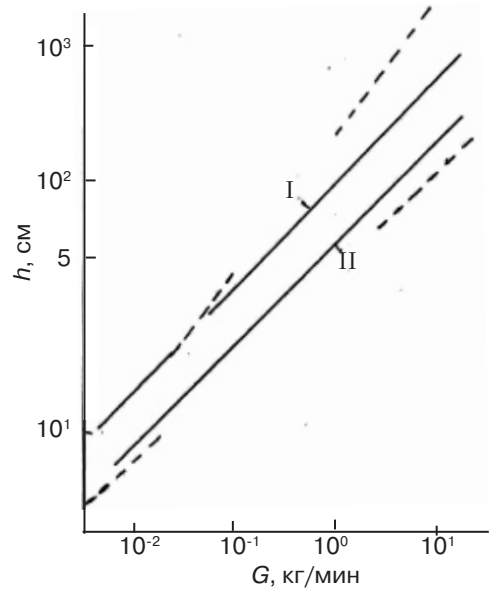


Рис. 4. Условия подавления всплесков при парофазной десульфурации

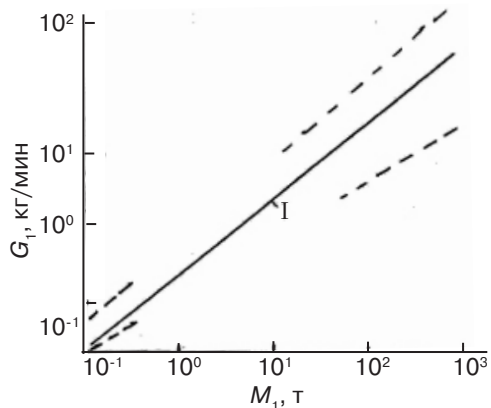


Рис. 5. Рациональный режим парофазной десульфурации

линия I и нанесена область отечественных и зарубежных экспериментальных данных, ограниченная пунктирными линиями, которые довольно хорошо отвечают результатам расчета.

*Порошковая проволока (ПП)*

При использовании ПП для десульфурации чугуна ее стальная оболочка толщиной  $\delta$  растворяется вследствие науглероживания до некоторого содержания углерода  $C_m$ , при котором температура плавления металла оболочки  $t_m$  станет  $t_m \leq t_1$  ( $t_1$  – температура чугуна). Коэффициент внешнего переноса углерода  $\beta_C = (D_C/\tau^*)$ , где  $D_C$  – коэффициент молекулярной диффузии углерода в чугуне;  $\tau^*$  – про-

должительность обновления поверхности по Данквертсу. При продольном перемещении ПП  $\tau^* = l/w$ , где  $l$  – длина пути продольного перемещения;  $w$  – скорость подачи ПП, а при поперечном –  $\tau^* = d/w$ . При содержании углерода в чугуне  $C_1$  удельная интенсивность его переноса будет  $i_C = \beta_C (C_1 - C_m \rho_1) / 100$  и за время  $dt$  будет перенесена масса  $dM_C = i_C F dt$  ( $F$  – площадь поверхности ПП), что вызовет изменение концентрации углерода в оболочке  $d_c = 100 dM_C / F \delta \rho_1$ . После подстановок и преобразований, интегрируя полученное выражение в пределах  $C = 0$  при  $\tau = 0$  и  $C = C_m$  при  $\tau = \tau_m$ , получим, что продолжительность расплавления ее оболочки составляет

$$\tau_m = \ln [C_1 / (C_1 - C_m)] x^{1/2} \delta / D_C^{1/2} w^{1/2}, \tag{10}$$

где  $x$  – характерный размер;  $l$  или  $d$ , а длина ПП в металле к этому моменту будет  $L = w \tau_m$ .

В жидкой стали оболочка ПП плавится с коэффициентом внешнего теплообмена  $\alpha_1 = (\lambda_1 \rho_1 c_1 / \tau^*)^{1/2}$ , где  $\lambda_1 \rho_1 c_1$  – коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость металла. При удельной интенсивности теплообмена  $a = \alpha_1 (t_1 - t_m)$  и за время  $dt$  через площадь  $F$  будет перенесено количество тепла  $dH = q F dt$ , что вызовет расплавление оболочки ПП на величину  $d\delta = dH / \rho_{ТВ} F \Delta H_m$ , где  $\rho_{ТВ}$  – плотность металла оболочки;  $\Delta H_m$  – удельная теплота плавления. После подстановок и преобразований получим выражение для продолжительности расплавления оболочки

$$\tau_m = \rho_{ТВ} \Delta H_m \delta x^{1/2} / (\lambda_1 \rho_1 c_1)^{1/2} (t_1 - t_m) w^{1/2}, \tag{11}$$

а путь, пройденный при этом ПП, будет  $L = w \tau_m$ .

На рис. 6 для  $\delta, d_1$  (мм) и  $w$  (м/мин) рассчитанная величина  $L$  сопоставлена с глубиной ванны при обработке чугуна магнием при  $x = d$  (а) и  $x = 1$  (б), и  $t_1 = 1300$  °С (линии Ia), и 1400 °С (линии Ib), и при обработке стали силикокальцием при  $t_1 = 1580$  °С (линии IIa), и 1650 °С (линии IIб), для  $x = d$  (в) и  $x = l$  (г). Во всех случаях фактическая глубина ванны  $H_i > L$  и, по-видимому, оболочка ПП разрушается, не достигнув дна ванны. Принимая во внимание неконтролируемое поведение ПП, полученные результаты следует считать весьма ориентировочными.

*Размеры частиц*

Размеры частиц магния и кальция при вдувании или вводе ПП должны обеспечить их усвоение, если параметры технологии дают возможность отдельного образования из них пузырей размера  $D_p = d_p (v \rho_p T_1 K / 100 M_p 273)^{1/3}$ , где  $v$  – мольный объем газа;  $\rho_p$  – плотность частицы;  $K$  – содержание в ней реагента;  $M_p$  – мольная

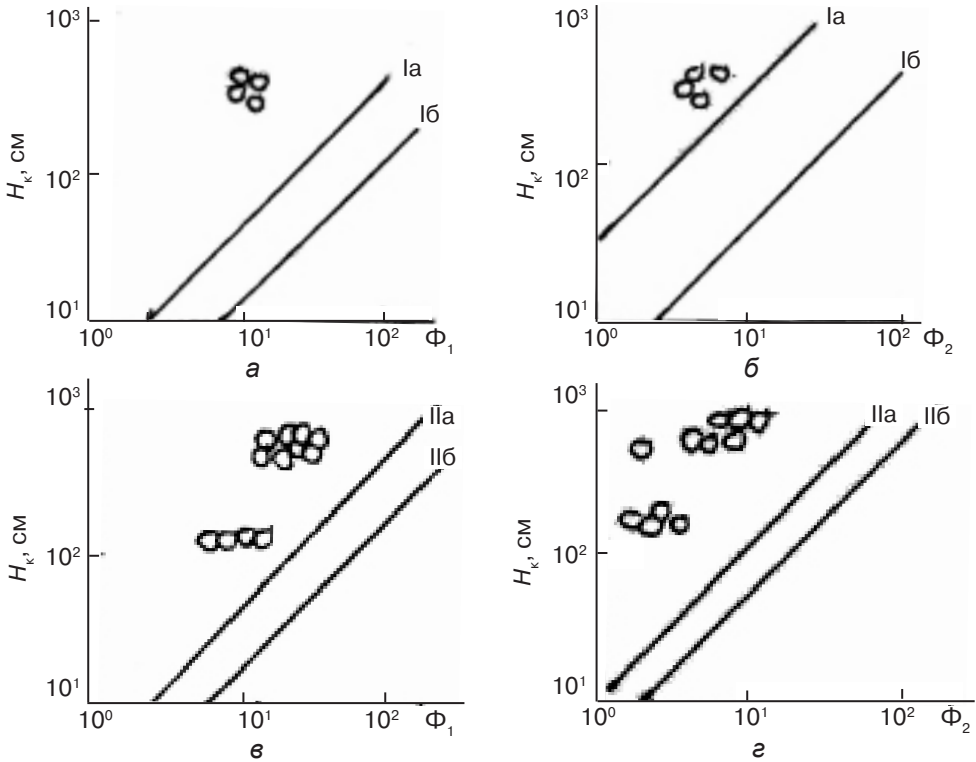


Рис. 6. Оценка глубины погружения ПП в ванну

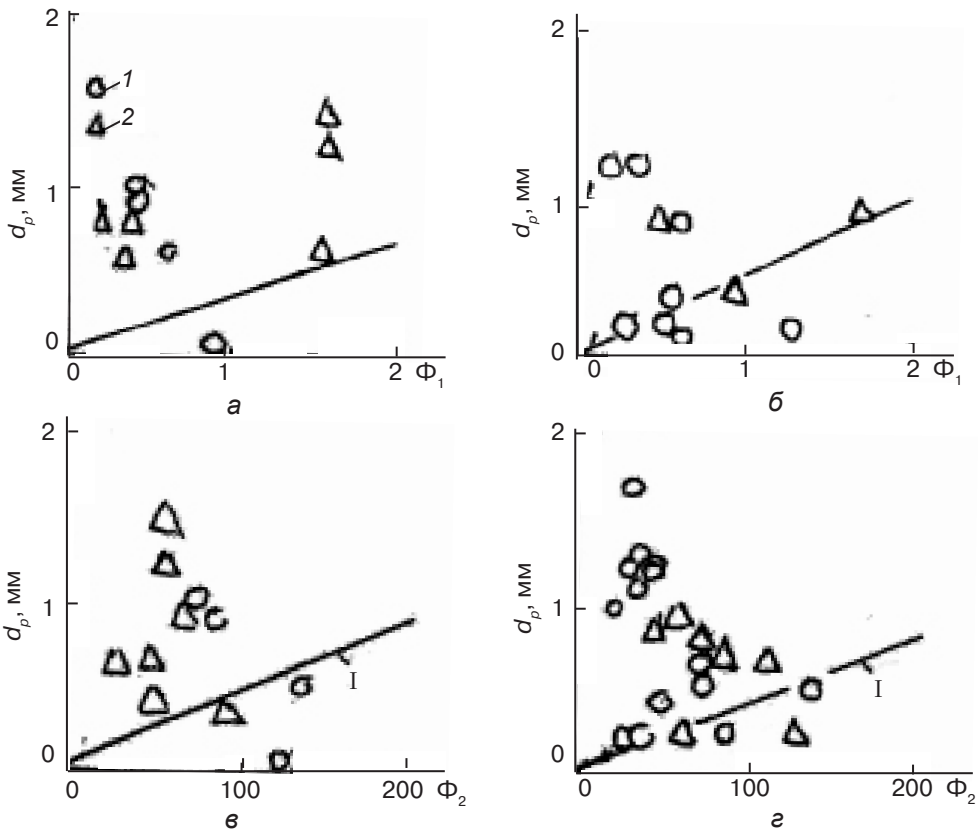


Рис. 7. Необходимый размер частиц десульфуратора: 1, 2 – отечественная и зарубежная практика

масса. Используя модель внешнего и внутреннего переносов к образующемуся пузырьку, изложенную в [2], можно выделить, соответственно, комплексы переменных  $\Phi_1 \equiv (Sh)^{4/7}/k^{1/3}$  и  $\Phi_2 \equiv h/k^{1/3}$  ( $Sh$  – число Шервуда [2]). На рис. 7 рассчитанные зависимости  $d_p$  от этих комплексов для кальция и магния (а, б) и (в, г) (линии I) сопоставлены с фактически использовавшимися в отечественной и зарубежной практике (точки). Лишь в отдельных случаях последние обеспечивают полное усвоение десульфуратора, а в большинстве случаев фактическая величина частиц находится выше линии I и недостаточно мала.

### Выводы

Составлена модель, позволяющая определять параметры технологии парофазной десульфурации металла магнием и кальцием. Результаты расчета по модели и экспериментальные данные находятся в удовлетворительном соответствии.



### Список литературы

1. Охотский В. Б. // Парофазная десульфурация металла. Гидродинамика // Процессы литья. – 2013. – № 1. – С. 22-28.
2. Охотский В. Б. // Парофазная десульфурация металла. Усвоение реагентов // Там же. – 2013. – № 2. – С. 3-8.
3. Охотский В. Б. Модели металлургических систем. – Днепропетровск: Системные технологии, 2006. – 287 с.
4. Adelberg M. // AiAA J. – 1967. – V. 5, № 8. – P. 1408-1415.
5. Воронова Н. А. Десульфурация чугуна магнием. – М.: Металлургия, 1980. – 240 с.
6. Внепечное рафинирование чугуна и стали / И. М. Борнацкий, В. И. Мачикин, В. С. Шевченко и др. – Киев: Техніка, 1979. – 168 с.

Поступила 24.10.12

УДК 621.74.043:669.715

**В. П. Головаченко, И. В. Хвостенко, А. Г. Вернидуб**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## ЧТО ДАЕТ РОТОРНАЯ ОБРАБОТКА АЛЮМИНИЕВЫХ РАСПЛАВОВ В ПРЕДКРИСТАЛЛИЗАЦИОННОЙ ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУР?

*Рассмотрены особенности роторной обработки алюминиевых расплавов в надликвидусной области температур. Показано, что ротор наряду с созданием упругих гармоничных колебаний генерирует дополнительное множество центров кристаллизации за счет переохлаждения контактирующих с поверхностью ротора слоев расплава, которые равномерно распределяются в объеме расплава. Представлен пример практического использования роторной обработки расплава в процессе реолитья алюминиевых сплавов.*

**Ключевые слова:** ротор, алюминиевый сплав, реолитье, тиксолитье.