

*Эссельбах В.С.,  
к.т.н. Эссельбах С.Б., к.т.н. Куберский С.В.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

## **ГИДРОМЕХАНИКА РЕАКТОРА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВОВ**

*Розглянуто гідромеханіку електромагнітного реактора для рафінування і легування розплавів. Розроблено методику проектування основних конструкційних елементів реактора та електричних параметрів обробки.*

**Ключові слова:** *електромагнітний реактор, активна зона, міксерна зона, гідромеханіка, електромагнітне поважчення, рівень розплаву, циркуляція.*

*Рассмотрена гидромеханика электромагнитного реактора для рафинирования и легирования расплавов. Разработана методика проектирования основных конструкционных элементов реактора и электрических параметров обработки.*

**Ключевые слова:** *электромагнитный реактор, активная зона, миксерная зона, гидромеханика, электромагнитное утяжеление, уровень расплава, циркуляция.*

Повышение эффективности металлургического производства посредством снижения его энерго- и материалоемкости является достаточно актуальным направлением исследований в современных условиях. Одним из перспективных направлений улучшения технико-экономических показателей процессов насыщения расплавов полезными компонентами при получения лигатур и рафинирования их от вредных примесей является использование электромагнитных воздействий.

Теория и технология обработки расплавов в скрещенных электрическом и магнитном полях относительно нова и требует дополнительных научных исследований термодинамики, кинетики и гидромеханики с целью получения дополнительных сведений и параметров обработки, а также усовершенствования используемого оборудования.

Донбасским государственным техническим университетом разработан электромагнитный (ЭМ) реактор, который достаточно эффективен при получении железокремнемагниевого (ЖКМ) лигатур и десульфурации чугуна [1].

ЭМ реактор (рис. 1) содержит активную (АЗ) и миксерную (МЗ) зоны. АЗ размещается в рабочем зазоре электромагнита (рис. 2). Поперек продольной оси активной зоны создано магнитное поле с индукцией  $B$ , Тл. Вдоль продольной оси АЗ по расплаву проходит ток  $I$ , кА. В расплаве АЗ действуют скрещенные магнитное и электрическое поля. Взаимодействие этих полей образует в расплаве ЭМ ускорение  $g_e$ , м/с<sup>2</sup>. Направляя  $g_e$  вверх или вниз, получаем соответственно «облегчение» или «утяжеление» расплава в АЗ. Размеры АЗ жестко ограничены размерами рабочего зазора электромагнита.

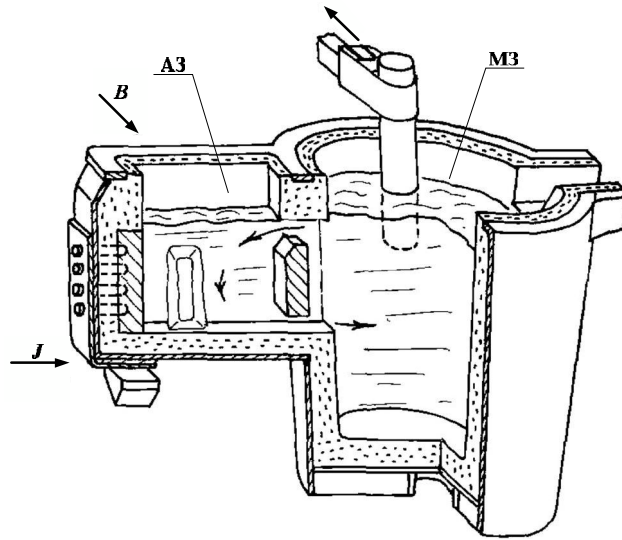
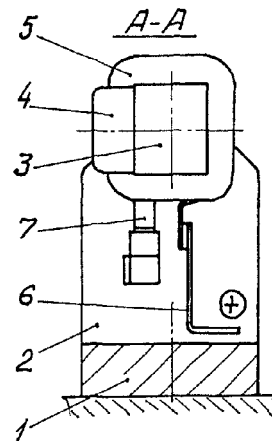
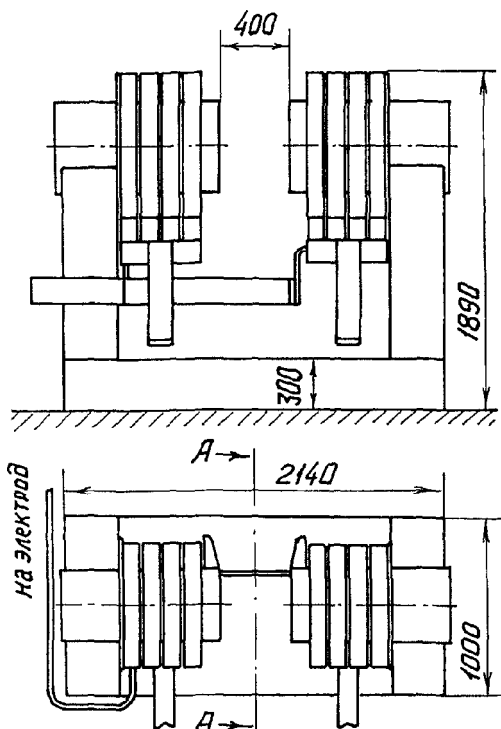


Рисунок 1 – Реактор для электромагнитной обработки расплавов



- 1 – тыльная часть; 2 – боковина; 3 – полюс; 4 – направляющая планка; 5 – катушка; 6 – коммутация подвода; 7 – коммутация выводов

Рисунок 2 – Электромагнит установки «ЭМУГ – 2»

Миксерная зона ЭМ реактора в размерах не ограничена. Размеры МЗ назначают конструктивно на необходимую производительность установки.

Разрез ЭМ реактора по продольной оси АЗ показан на рисунке 3. Частично обозначена контактирующая с АЗ миксерная зона (МЗ), соединенная переливными каналами. Через эти каналы расплав МЗ прокачивается через АЗ. Для обработки расплава в АЗ подают соответствующие присадки. Вследствие циркуляции расплава через АЗ все содержимое ЭМ реактора насыщается или освобождается от примесей, в зависимости от решаемых задач и поданных присадок. Если удельная электропроводность присадки больше, чем у обрабатываемого расплава, ток АЗ перераспределяется. Через присадку проходит ток большей величины, чем через окружающий расплав. Присадка утяжеляется сильнее, чем окружающий расплав. Изменяя  $B$  и  $I$ , делают кажущийся удельный вес легкой присадки больше, чем у окружающего расплава. Присадка с меньшей плотностью погружается в более плотный окружающий расплав и находится там до полного усвоения. Таким способом на Стахановском заводе ферросплавов делали ЖКМ лигатуру, растворяя слитки магния в жидком ферросилиции. Пирозффект при этом отсутствует. Извлечение магния в лигатуру на 20% больше, чем при вводе пакетов из слитков магния в ковш с ферросилицием на штанге [2].

Необходимая циркуляция расплава через АЗ, показанная на рисунке 3, достигается как выбором силового воздействия на расплав, так и конструктивными параметрами АЗ.

Силовое воздействие, например, для потопления слитка магния в жидком ферросилиции, должно удовлетворять условию

$$\frac{B \cdot I}{\rho \cdot g \cdot F_0} > K; \text{ причем } K \cdot g = g_e \quad (1)$$

где  $B$  – индукция магнитного поля, Тл;

$I$  – сила тока на ванне АЗ, кА;

$\rho$  – плотность расплава, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение силы тяжести, 9,81 м/с<sup>2</sup>;

$g_e$  – ЭМ ускорение, м/с<sup>2</sup>;

$F_0$  – площадь поперечного сечения расплава, находящегося в АЗ, нормальная к направлению тока, м<sup>2</sup>.

$K$  – «критерий потопления», параметр, зависящий от плотности и удельного электросопротивления присадки и расплава.

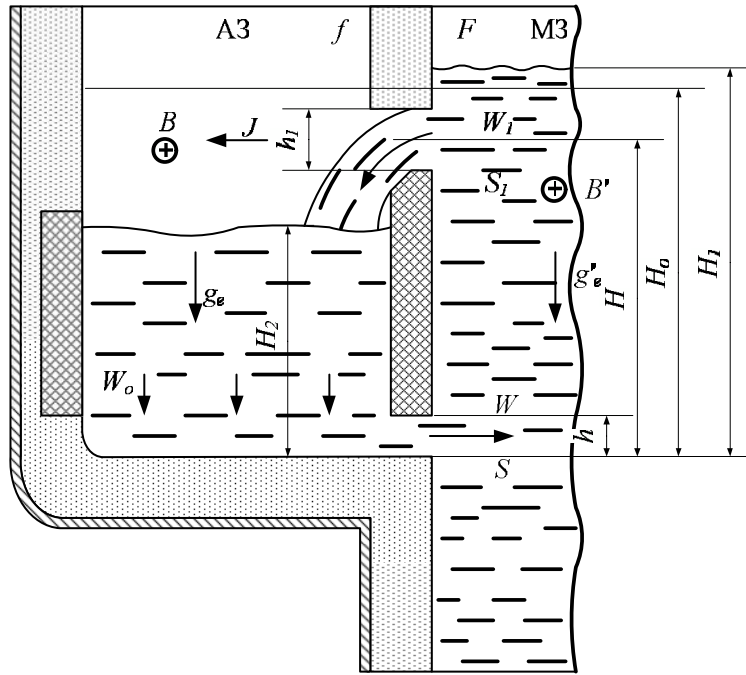


Рисунок 3 – Разрез ЭМ реактора по продольной оси АЗ

Этот параметр определяется из выражения:

$$K = \frac{1 - \beta}{1 - \alpha}, \quad (2)$$

где  $\beta$  – отношение плотности присадки и расплава;

$\alpha$  – отношение их удельных электросопротивлений.

В процессе обработки свойства взаимодействующих материалов изменяются. При получении ЖКМ лигатуры расплав насыщается магнием и соответственно уменьшается его электросопротивление, изменяется плотность вследствие нагрева присадки и остывания расплава. Поэтому в процессе обработки требуется регулировать силу тока на ванне АЗ в соответствии с изменением параметра  $K$ .

Зависимость силового воздействия  $B \cdot I$  от силы тока на ванне АЗ показана на рисунке 4. В частности, при получении ЖКМ лигатуры вводом слитков магния в расплав ферросилиция ток регулируют с пульта, визуально наблюдая за погружением слитков. Если усвоение слитков замедляется, силу тока увеличивают. График (рис. 4) построен для магнита, показанного на рисунке 2.

Геометрические параметры АЗ выбирают исходя из назначения ЭМ реактора. Для получения ЖКМ лигатуры растворением слитков магния в ферросилиции сначала определяют необходимые размеры АЗ. Пространство АЗ должно вмещать количество расплава, в которое мо-

жет погрузиться слиток магния размерами  $500 \times 160 \times 80$  мм, массой 8,2 – 8,5 кг. Для этого, с учетом размера рабочего зазора магнита, ширину АЗ приняли равной 200 мм. В оставшемся пространстве между полюсами магнита размещается металлоконструкция АЗ, футеровка и постановочный зазор. Длина АЗ для возможности размещения в ней слитка магния была выбранной 750 мм, а глубина ванны расплава в процессе обработки  $H_2 = 550$  мм.

Процесс получения лигатуры заключается в следующем. Первоначально реактор заполняли жидким ферросилицием до уровня  $H_0$ . Затем в обмотки возбуждения электромагнита и в расплав АЗ подавали ток. Под действием ЭМ утяжеления  $g_e$ , которое алгебраически складывается с ускорением силы тяжести  $g$ , уровень металла в АЗ понижается и становится равным  $H_2$ . Уровень расплава в МЗ повышается и становится равным  $H_1$ . Происходит циркуляция расплава. Через нижний переливной канал, высотой  $h$  (рис.3), металл выжимается из АЗ в МЗ со скоростью  $W$ . Через верхний канал, высотой  $h_1$ , со скоростью  $W_1$  перетекает обратно в АЗ. Параметры  $H_0$ ,  $H$ ,  $H_1$ , а также размеры сечений переливных каналов  $S$  и  $S_1$  определяются с учетом размеров АЗ, МЗ и выбранного значения параметра  $H_2$ . Эти размеры взаимосвязаны. Площадь АЗ в плане составляет  $f$  м<sup>2</sup> (в рассматриваемом примере  $750 \times 200$  мм), площадь МЗ в плане –  $F$ , отношение  $F/f = m$  (рис. 3).

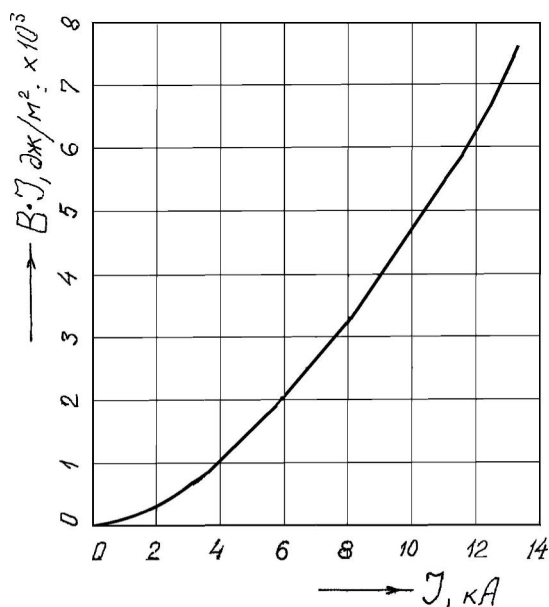


Рисунок 4 – Зависимость силового воздействия от силы тока

На основании закона сохранения массы устанавливаем соотношение между параметрами геометрических напоров

$$f(H_0 - H_2) = F(H_1 - H_0) \quad (3)$$

$$m \cdot H_1 = (m + 1) \cdot H_0 - H_2; \quad (3a)$$

$$H_1 = \frac{m+1}{m} H_0 - \frac{H_2}{m}; \quad H_2 = (m+1) \cdot H_0 - m \cdot H_1.$$

В процессе циркуляции расплава через АЗ соблюдается закон неразрывности потока. Сколько металла вытекает из АЗ через нижний канал, столько же натекает обратно через верхний. Достижение равновесия между приходом и расходом расплава через АЗ реактора характеризуется соотношением

$$W \cdot S = W_1 \cdot S_1, \text{ м}^3/\text{с}; \quad S/S_1 = n \quad (4)$$

Чтобы уровень металла в АЗ был заданным  $H_2$ , находим параметры  $g_e$ ,  $H$ ,  $S$ ,  $S_1$  и  $h$ . Уровень металла в МЗ  $H_1$  устанавливается в соответствии с выражениями (3) и (3a). Уровень налива  $H_0$  также определяется с учетом законов сохранения массы (3) и неразрывности потока (4).

Скорости металла в нижнем канале  $W$  и в верхнем  $W_1$  соответственно составляют (из рис.3 и выражения (3))

$$W = \varphi \cdot \sqrt{2g((K+1)(H_2 - \frac{1}{2}h) - (\frac{m+1}{m}H_0 - \frac{H_2}{m} - \frac{1}{2}h))}, \text{ м/с} \quad (5)$$

$$W_1 = \varphi \cdot \sqrt{2g(\frac{m+1}{m}H_0 - \frac{H_2}{m} - H)}, \text{ м/с} \quad (6)$$

В этих формулах  $\varphi$  – коэффициент расхода,  $\approx 0,8$ ;  $K$  – критерий потопления, остальные параметры представлены на рисунке 3.

В выражении (5) подкоренное число должно быть положительным. Иначе оно не имеет физического смысла. Проектирование ЭМ реактора заключается в совместном решении уравнений (1) - (6) на ЭВМ. Конкретный пример такого исследования представлен таблицей 1.

Среди параметров АЗ различали 6 аргументов. Из них четыре параметра ( $H$ ,  $m$ ,  $h$ ,  $n$ ) выбраны и назначены конструктивно. Они в процессе обработки расплава не изменяются, являются постоянными. Изменение этих параметров производится при смене футеровки ковша-реактора. Два параметра ( $K$ ,  $H_0$ ) в процессе работы изменяются действиями персонала. Эти параметры являются регулирующими. Параметр  $K$  изменяется регулированием силы тока в рабочем контуре установки с пульта управления в соответствии с уравнением (1). Параметр  $H_0$  (уровень налива) необходимо

держат постоянным, т.е. наливать в реактор одно и то же количество металла. Используя методику исследования (табл. 1), вводя ограничения  $H_2 \geq 0,55$  (слиток должен помещаться в АЗ в вертикальном положении),  $W > 0$ ,  $W_1 > 0$ ,  $K = 0,75 - 0,9$  выбираем конструктивные параметры  $H$ ,  $h$ ,  $m$ ,  $n$  и  $H_0$ . В процессе обработки регулирование уровня выполняется с пульта изменением тока, т.е. параметром  $K$ . Параметр  $H_2$  задается по условиям технологии и поддерживается постоянным, выполняя условие (4)  $W \cdot h - W_1 \cdot h_1 \rightarrow 0$  (например,  $10^{-3} - 10^{-4}$ ). При величине  $W \cdot h - W_1 \cdot h_1 < 0$  уровень  $H_2$  повышается, а если эта величина положительная – понижается. Вследствие изменения скоростей  $W$  и  $W_1$  уровень металла в АЗ стабилизируется на заданной отметке  $H_2$ . Чем меньше разность  $W \cdot h - W_1 \cdot h_1$ , тем меньше колебание уровня  $H_2$ . Его стабилизация всегда соответствует условию  $W \cdot S = W_1 \cdot S_1$ , где  $S = b \cdot h$ ;  $S_1 = n \cdot b \cdot h$ ;  $b = 0,2$  (ширина АЗ, м).

Содержимое АЗ в процессе обработки постоянно обновляется за счет перетекания металла через верхний переливной канал. Например, для обстановки (рис.3 и табл.1) при  $W \cdot h - W_1 \cdot h_1 = 0$ , расходы металла через верхний и нижний каналы (высотой  $h_1$  и  $h$  соответственно) при  $W = W_1 = 1,24$  м/с составляют  $b \cdot h \cdot W = b \cdot h_1 \cdot W_1 = 0,2 \cdot 0,1 \cdot 1,24 = 0,0248$  м<sup>3</sup>/с. Объем металла в АЗ равен  $0,75 \cdot 0,2 \cdot 0,55 = 0,0825$  м<sup>3</sup>. Полное обновление содержимого АЗ происходит за  $0,0825 / 0,0248 = 3,4$  с. Слиток магния усваивается в АЗ за 20 с. За это время металл – растворитель в АЗ обновляется 5–6 раз. Этот показатель можно изменять за счет соответствующего выбора  $h$ .

Объем металла в МЗ около 2,5 м<sup>3</sup>. Весь металл прокачивается через АЗ за время  $2,5 / 0,0248 \approx 1000$  с  $\approx 16-17$  мин. Время ввода заданного количества магния составляет 15–20 мин. Таким образом, за время обработки весь металл, заполняющий реактор, проходит через АЗ и равномерно насыщается материалом присадки. Это обеспечивает однородность полученной лигатуры по содержанию магния.

Расплав, находящийся в МЗ, перемешивается дополнительно за счет следующих явлений:

– за счет перемешивающего действия струи, вытекающей в МЗ через нижний переливной канал. С количественной стороны, перемешивающее влияние оценивается величиной эффективного коэффициента диффузии  $D_e$ , м<sup>2</sup>/с

$$D_e = \frac{I_c \cdot l}{M},$$

где  $I_c$  – импульс струи,  $I_c = \rho \cdot W^2 \cdot S$ , Н·с;

$l$  – гидравлический диаметр ванны, м;

$M$  – масса перемешиваемого расплава, кг.

Таблица 1 – Результаты математического моделирования гидродинамики ЭМ реактора при различных значениях параметров влияющих на циркуляцию расплава

Параметры активной зоны для $m = 10$ (выбирается при конструировании)		Обозначение	Параметры влияющие на циркуляцию расплава									
			$n$		$h$		$H$		$K$		$H_0$	
Характеристика параметров	Определены конструкцией	$H$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,65	0,75	0,7	0,7	0,7	0,7
		$h$	0,05	0,05	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
		$n$	0,5	1,5	1	1	1	1	1	1	1	1
	Регулирующие	$K$	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,75	0,85	0,8	0,8
		$H_0$	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,75	0,85
	Поддерживаемые	$H_2$	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
	Получаются при изменении других параметров	$W_1$	1,24	1,24	1,24	1,24	1,46	0,96	1,24	1,24	0,926	1,48
		$W_1 \cdot h$	0,124	0,041	0,124	0,062	0,073	0,048	0,062	0,062	0,046	0,074
		$W$	1,45	1,45	1,24	1,33	1,33	1,33	1,21	1,45	1,56	1,05
		$W \cdot h$	0,072	0,072	0,124	0,067	0,067	0,067	0,06	0,072	0,078	0,052
		$H_1$	0,825	0,825	0,825	0,825	0,825	0,825	0,825	0,825	0,825	0,77
	$(W \cdot S - W_1 \cdot S_1)/b, м^3/с$			-0,05	+0,03	0	+0,005	-0,006	+0,019	-0,002	+0,01	+0,032



– через расплав МЗ в направлении АЗ проходит ток  $I$ . Магнитное поле зазора бочкообразное, т.е. магнитные силовые линии проходят и по металлу МЗ. Индукция поля  $B'$ , действующая в МЗ, составляет  $\approx 0,05$  Тл. На участке расплава, примыкающего к АЗ, тоже имеется  $g_e$ . Оно меньше, чем в АЗ, но достаточно для образования нисходящего потока металла и формирования дополнительного контура циркуляции расплава в МЗ. Согласно принципа независимости действия сил,  $D_e$  в МЗ равен сумме эффективных коэффициентов диффузии, полученных от действия перечисленных явлений. Это еще один фактор, положительно влияющий на ход процесса получения лигатуры ЭМ способом и особенно на ее однородность.

Количественная оценка для  $D_e$  по объему МЗ дает в среднем  $(2\div 3)\times 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$ . Эта величина меньше, чем в АЗ ( $3,5\times 10^{-1} \text{ м}^2/\text{с}$ ), но достаточно большая. Перемешивание в МЗ по интенсивности сравнимо с перемешивающим действием струи при наливке металла в ковш. Если оценивать перемешивание величиной числа  $Re$ , то в активной зоне  $Re \approx 10^5 - 10^4$ ; в миксерной –  $Re \approx 10^3$ .

Экспериментально установлено, что относительная величина химнеоднородности лигатуры по содержанию магния при его вводе в ферросилиций ЭМ способом составляет  $\pm 3,3\%$ . Это намного меньше, чем предусмотрено действующими ТУ на ЖКМ лигатуры ( $\pm 15\%$ ).

Предложенная методика проектирования позволяет по известным параметрам ковша в котором производится обработка и который является в свою очередь миксерной зоной электромагнитного реактора проектировать конструктивные параметры активной зоны и электромагнита с учетом рабочих характеристик имеющегося источника тока. Аналогично может решаться задача проектирования если за исходные данные выбираются параметры источника электропитания.

#### **Библиографический список**

1. *Электромагнитная обработка расплавов: (Монография) / С.Б. Эссельбах, С.В. Куберский, В.Н. Дорофеев, В.С. Эссельбах, С.В. Семирягин; ДонГТУ – Алчевск: ИПЦ «ЛАДО», 2006. – 138 с.: ил., табл. – Библиогр. с.: 134 – 138.*

2. *Эссельбах В.С., Куберский С.В. Совершенствование технологии производства железокремнемагниевого лигатур. Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. 50 лет в Академии наук Украины: ИЛП, ИПЛ, ФТИМС – прошлое, настоящее, будущее: – Киев: Редакция журнала «Процессы литья» при участии МП «Информлитъе», 2008. С.76–79.*

*Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Петрушовым С.Н.*