

*к. т. н, доц. Эссельбах С.Б.,  
ассистент Эссельбах В.С.,  
к. т. н, доц. Куберский С.В.,  
аспирант Васильев Д.Б.,  
аспирант Кузнецов Д.Ю.,  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

## **ПИНЧ-ЭФФЕКТ И ТЕРМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛУЧЕНИИ КРЕМНЕ-МАГНИЕВОЙ ЛИГАТУРЫ**

*У статті досліджено вплив пінч-ефекту на засвоєння магнію у ферросилиції при електромагнітному отриманні кремнемагнієвих лігатур. Встановлено, що поверхня реагування під дією пінч-ефекту збільшується на 10-15 %; кожен відсоток магнію, що вводиться, додатково охолоджує розплав на 10-12 градусів.*

Прогресс в машиностроении Украины невозможен без широкого применения высокопрочного чугуна для отливок, что позволяет уменьшить металлоемкость и увеличить прочность деталей. Для получения отливок из высокопрочного чугуна (ВЧ) требуется кремнемагниева лигатура.

В свою очередь, лигатуру получают вводом магния в жидкий ферросилиций.

Проблема заключается в том, что магний (плотность 1,5 кг/л) надо вводить в жидкий ферросилиций принудительно. Держать слиток магния в глубине расплава ферросилиция удается, пока магний еще твердый. Расплавившийся магний всплывает на поверхность металла, испаряется и горит. Усвоение магния в расплав составляет 50-60 %.

Сотрудниками кафедры МЧМ ДонГТУ предложен и реализован бесконтактный способ удержания как твердого, так и жидкого магния в глубине расплава ферросилиция электромагнитной силой.

Задачей данной статьи является анализ электрического и теплотехнического взаимодействия магния с расплавом ферросилиция при производстве кремнемагниевого лигатур.

При электромагнитном вводе магния в расплав ферросилиция взаимодействующие фазы находятся в скрещенных магнитном и электрическом полях. Через расплав проходит ток, усредненная плотность которого  $j_0$  составляет примерно  $10^5$  А/м<sup>2</sup>. Но плотность тока в магнии и в расплаве разная. Ток распределяется пропорционально проводимости магния и расплава. Проводимость участка, на котором находится маг-

ний, в соответствии с правилом определения проводимости цепи из двух параллельных проводников, равна:

$$\sigma_{\Sigma} S = \sigma' \cdot S' + \sigma \cdot (S - S'), \text{ м/Ом} \quad (1)$$

Плотность тока в расплаве и в магнии соответственно:

$$j' = j_0 \frac{\sigma' S'}{\sigma_{\Sigma}}; \quad j = j_0 \frac{\sigma(S - S')}{\sigma_{\Sigma}} \quad (2)$$

Символы со штрихом относятся к магнию.

Если слиток погружен в расплав (рис. 1), то при величине тока на ванне 10 кА, площади сечения ванны  $0,1 \text{ м}^2$ , площади погруженного слитка  $0,084 \text{ м}^2$ , а также  $\sigma' = 2,86 \cdot 10^6 \text{ } \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$ ,  $\sigma = 0,91 \cdot 10^6 \text{ } \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$ , плотность тока соответственно:

$$j' = j_0 \cdot \frac{\sigma' S'}{\sigma_{\Sigma}} = \frac{2,86 \cdot 10^6 \cdot 0,084}{2,86 \cdot 10^6 \cdot 0,084 + 0,91 \cdot 10^6 \cdot 0,016} = 0,943 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2,$$

$$j = j_0 \cdot \frac{\sigma(S - S')}{\sigma_{\Sigma}} = \frac{0,91 \cdot 10^6 \cdot 0,016 \cdot (0,1 - 0,084)}{2,86 \cdot 10^6 \cdot 0,084 + 0,91 \cdot 10^6 \cdot 0,016} = 0,057 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2.$$

Пока с плавящегося слитка стекает жидкий магний, предположительно каплями  $\approx 1 \text{ см}^3$ , соотношение между площадями поперечного сечения магния и расплава остается прежним. Плотности тока в участниках процесса при этом не изменяются. Через каплю  $1 \text{ см}^3$  (площадь ее поперечного сечения  $\approx 1 \text{ см}^2$ ) проходит ток:  $I_K = 0,943 \cdot 10^5 \cdot 10^{-4} = 9,43 \text{ А}$ .

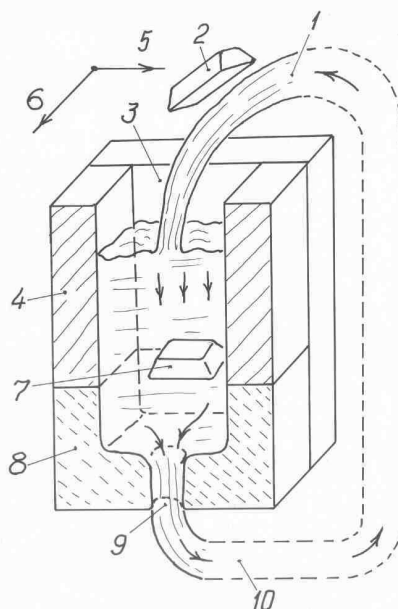


Рисунок 1 – Рабочее пространство установки

Давление от пинч-эффекта в экваториальном сечении предполагаемой капли, нормальном к направлению тока [1]:

$$P = 1,02 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{I^2}{S} = 1,02 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{9,43^2}{10^{-4}} \cong 0,01 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} \approx 10^3 \text{ Па}.$$

Градиент этого давления вдоль направления тока способен вытянуть каплю. Давление  $10^3$  Па эквивалентно энергии в  $1 \text{ см}^3$  (гипотетический объем капли)  $10^{-3}$  Дж. Адгезия капли к окружающему расплаву составляет удвоенное поверхностное натяжение магния. Угол смачивания магнием расплава равен нулю,  $\cos\Theta=1$ , работа адгезии  $2\sigma$  (в данном случае  $\sigma$  – поверхностное натяжение магния, составляет  $0,51 \text{ Н/м}$ ). Поверхностная энергия капли составляет  $4\pi R^2 \cdot 2\sigma \cdot 10^{-4} = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$ , т.е. меньше объемной энергии, полученной каплей от пинч-эффекта. С вытягиванием капли вдоль тока плотность его не меняется, т.е. остается равной  $9,43 \text{ А/см}^2$ , а радиус капли уменьшается. Числитель  $I^2$  уменьшается во второй степени, а площадь в первой степени. Уменьшается объемная энергия жидкого образования, а объем остается без изменения. Зато увеличивается поверхность жидкого фрагмента. Процесс растягивания капли будет происходить до тех пор, пока энергия давления от пинч-эффекта и энергия сил поверхностного натяжения не уравновесят друг друга.

Геометрическая модель растянутой капли может быть представлена цилиндрической частью, ограниченной с торцов полушариями. Первоначальный объем  $\frac{4}{3}\pi R^3$ , из геометрических соображений, через новые размеры  $r$  и  $l$  (длина цилиндрической части) выражается формулой:

$$\frac{4}{3}\pi R^3 = \pi r^2 \left( \frac{4}{3}r + l \right) \quad (3)$$

Площадь новой поверхности, которая первоначально была  $4\pi R^2$ , через те же  $r$  и  $l$ , составляет:

$$4\pi R^2 = 2\pi r(2r + l) \quad (4)$$

Поскольку объем капли не изменяется, то новые размеры  $r$  и  $l$  определяем по формуле (3), а для определения площади поверхности растянутой капли подставляем эти значения в формулу (4). В таблице показано, как по мере сжатия пинч-эффектом сферического тела с первоначальным радиусом  $0,5 \text{ см}$  могут изменяться его размеры  $r$ ,  $l$  и площадь поверхности  $S_{\text{нов}}$ .

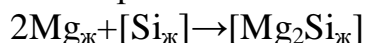
Изменение поверхностной и объемной энергии сферической капли в зависимости от степени ее деформации показано на рисунке 2. Пинч-эффект деформирует фрагменты стекающего со слитка магния на 25-30%, что способствует увеличению поверхности реагирования примерно на 10%, ускоряет усвоение магния.

Таблица – Изменение размеров и площади поверхности тела по мере сжатия пинч-эффектом

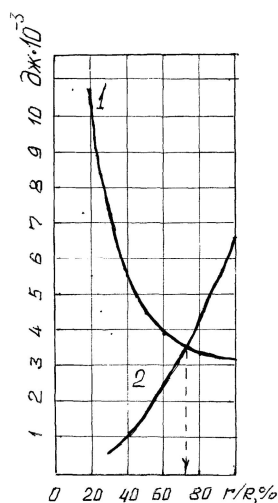
$$R_{\text{нач}} = 0,5\text{см}, V = 0,5338\text{см}^3, S_{\text{нач}} = 3,14\text{см}^2$$

$r, \text{см}$	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1
$l, \text{см}$	0,24	0,53	0,92	1,49	2,39	3,98	7,35	16,87
$S_{\text{пов}}, \text{см}^2$	3,22	3,34	3,56	3,93	4,53	5,5	7,2	10,72

Химически процесс представляет собою необратимое растворение магния в ферросилиции и наоборот по схеме:



Энтальпия образования силицида магния составляет – 6,2 ккал/г-атом, или 258 ккал/кг магния, т. е. растворение магния экзотермично. В результате образуется довольно прочный силицид, который конгруэнтно плавится при 1102 °С. Свободного магния в продукте реакции, т. е. растворе  $\text{Mg}_2\text{Si}$  в среде  $\text{Si} + \text{FeSi}$  очень мало. Под действием химического потенциала  $\text{Mg}_2\text{Si}$  возможно растворение силицида в магнии. Это вызывает небольшое снижение химического потенциала магния в самом магнии, но условий для достижения равновесия реакции в практических условиях не имеется. Возможно прекращение реакции, если израсходуется весь кремний, не связанный в силицид железа  $\text{FeSi}$ , и станет очень мал химический потенциал кремния, участвующего в реакции.



1 – поверхностная энергия  $2\sigma S_{\text{пов}}$ ;

2 – объемная энергия  $pV$  от сжатия пинч-эффектом

Рисунок 2 – Изменение поверхностной и объемной энергии сферической капли в зависимости от степени ее деформации

Температуры плавления взаимодействующих фаз составляют: магния 651 °С, кремния 1414 °С, железа 1539 °С, силицида магния 1102

$^{\circ}\text{C}$ , силицида железа  $1410^{\circ}\text{C}$ . Несмотря на сравнительно большую экзотермичность растворения магния, процесс в результате оказывается эндотермическим, потому что затраты тепла на нагрев чушек магния до температуры плавления, их расплавление и последующий перегрев магния до температуры окружающего расплава оказываются больше, чем тепловой эффект образования силицида магния.

Параллельно с затратами тепла на усвоение магния расплав остывает вследствие теплоотдачи в окружающую среду. Температура ликвидус ферросилиция-65 составляет  $\approx 1230^{\circ}\text{C}$ , лигатуры на базе ФС65  $\approx 1180\text{--}1190^{\circ}\text{C}$ . Чтобы без проблем выполнить разливку сплава на конвейерной разливочной машине, температура начала разливки лигатуры должна составлять  $\geq 1250^{\circ}\text{C}$ . Поэтому при внепечном способе приготовления лигатуры количество вводимого в ферросилиций магния и температура взятого для этого ферросилиция должны быть между собой согласованы. Выражение теплового баланса процесса растворения магния в ферросилиции:

$$(\bar{c}_{Mg_{me}} \cdot 651 + L_{Mg} + \bar{c}_{Mg_{жс}} (1250 - 651) - 258) \cdot M = \bar{c}_{FeSi_{жс}} (t_x - 1250)(1 - M), \quad (5)$$

где  $\bar{c}_{Mg_{me}}$  – средняя теплоемкость магния от температуры его ввода в расплав до температуры плавления,  $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$ ;

651 – температура плавления магния,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$L_{Mg}$  – теплота плавления магния, 80 ккал/кг;

$\bar{c}_{Mg_{жс}}$  – средняя теплоемкость магния от  $t_{пл}$  до температуры разливки расплава,  $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$ ;

258 – тепловой эффект растворения магния, ккал/кг;

$M$  – доля магния вготавливаемой лигатуре;

$\bar{c}_{FeSi}$  – средняя теплоемкость ферросилиция между температурой начала разливки ( $1250^{\circ}\text{C}$ ) и начальной температурой металла  $t_x + \Delta t$  (где  $\Delta t$  – потеря температуры от естественного остывания металла).

Истинную теплоемкость компонентов определяем по ее температурным рядам,  $\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{K}}$  [2].

Для магния:  $c_p = 22,32 + 10,26 \cdot 10^{-3}T - 0,431 \cdot 10^5/T^2$ .

Для кремния:  $c_p = 23,95 + 2,47 \cdot 10^{-3}T - 4,14 \cdot 10^5/T^2$ ,

при  $T > 1700\text{K}$ ,  $c_p = 6,13 \frac{\text{ккал}}{\text{г} \cdot \text{ат} \cdot \text{K}}$ .

Для железа:  $c_p = 17,5 + 24,79 \cdot 10^{-3}T$ .

В соответствии с этими данными определили и для расчетов по уравнению (5) теплового баланса приняли,  $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ :  $\bar{c}_{Mg_{me}} = 0,23$ ;

$\bar{c}_{Mg_{жс}} = 0,255$ ;  $\bar{c}_{FeSi_{жс}} = 0,2$ .

Решением уравнения (5) относительно температуры  $t_x$  получили формулу для ее определения при выбранных значениях теплоемкости и температуре начала разлива лигатуры. К  $t_x$  прибавляют  $\Delta t$  от потери тепла в окружающую среду.  $\Delta t$  составляет  $\approx 1,5$  °/мин.

$$t_x = \frac{250 - 87 \cdot M}{0,2 \cdot (1 - M)}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (6)$$

В среднем каждый процент магния, дополнительно к остыванию расплава в ковше, понижает температуру металла на 10 градусов. Но это только в том случае, если магний в глубине металла не испаряется и не барботирует расплав. Иначе остывание металла еще интенсивнее. На испарение магния затрачивается 1370 °ккал/кг, а испарившаяся часть не участвует в образовании силицида. Растворяющийся с образованием силицида магний не испаряется, потому что при температуре меньшей, чем температура кипения магния (1107 °С), связывается в силицид, не успевая нагреваться до температуры кипения. Испарение и горение может происходить с той частью расплавившегося магния, которая не успела прореагировать с кремнием и всплыла на поверхность. Роль электромагнитного утяжеления заключается в том, что магний не всплывает на поверхность, а вынужденная моторными силами конвекция интенсифицирует реакцию растворения.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие практические предложения:

1. Уделять больше внимания температуре расплава ферросилиция, отбираемого для производства лигатуры магний-кремний внепечным способом.

2. Бедные лигатуры ( $\approx 10\%$  Mg) целесообразно делать внепечным способом, а более богатые лучше получать сплавлением магния с ферросилицием в индукционных печах.

3. Желателен подогрев чушек магния.

*В статье выполнен анализ влияния пинч-эффекта на усвоение плавящегося в ферросилиции магния при электромагнитном получении кремнемагниевого лигатуры. Установлено, что поверхность реагирования под действием пинч-эффекта увеличивается на 10-15 %; каждый процент вводимого магния дополнительно охлаждает расплав на 10-12 градусов.*

*In the article the analysis of influence of pinch-effect is executed on mastering of fluxible magnesium in a ferrosilicon at the electromagnetic receiving of silicomagnesium ligature. It is set that the surface of reacting under the action of pinch-effect is multiplied on 10-15 %; every percent of the en-*

*tered magnesium additionally cools fusion on 10-12 degrees.*

**Библиографический список.**

1. Верте Л. А. Электромагнитная разливка и обработка жидкого металла. / Л. А. Верте. – М.: Металлургия, 1967. – 208 с.

2. Казачков Е.А. Расчеты по теории металлургических процессов: Учеб. пособие для вузов. / Е.А. Казачков – М.: Металлургия, 1988. – 288 с.

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