

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

ТЕПЛОМАССОБМЕН ПРИ РАСТВОРЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАГНИЯ В ЖИДКОМ ФЕРРОСИЛИЦИИ

Досліджено тепломасообмінні процеси та поведінку зливкового магнію при розчиненні його у розплаві ферросиліцію. Встановлено механізм занурення менш щільної та більш електропровідної присадки у більш щільний та менш електропровідний високотемпературний розплав під дією схрещених електричного та магнітного полів.

Ключові слова: залізокремнемагнійова лігатура, електромагнітне поле, розчинення, намерзання, тепломасообмін.

Исследованы тепломассообменные процессы и поведение слиточного магния при растворении его в расплаве ферросилиция. Установлен механизм погружения менее плотной и более электропроводной присадки в более плотном и менее электропроводном высокотемпературном расплаве под действием скрещенных электрического и магнитного полей.

Ключевые слова: железокремнемагниева лигатура, электромагнитное поле, растворение, намерзание, тепломассообмен.

В последние годы производство и потребление железокремнемагниевого (ЖКМ) лигатур как в нашей стране, так и за рубежом имеет тенденцию роста. В отечественной и зарубежной практике наиболее производительным и экономичным способом получения ЖКМ лигатур является растворение металлического магния в жидком высокопроцентном ферросилиции на ферросплавных заводах.

Экономическая и технологическая эффективность процесса получения ЖКМ сплавов в значительной степени обусловлена тепломассообменными процессами, сопровождающими ту или иную схему производства лигатуры.

Развитие теоретических положений тепломассообмена в фазах, сопровождающих процесс получения ЖКМ лигатур, позволит повысить степень усвоения магния и однородность получаемого сплава, уменьшить выбросы и дымообразование. Это будет способствовать улучшению технико-экономических показателей процесса производства ЖКМ и обработки ими железо-углеродистых расплавов.

Рассмотрим растворение металлического магния в 65 – процентном ферросилиции по двум вариантам, известным в производстве [1,2]:

– погружение пакетов из слитков магния, нанизанных на железную штангу, в ковш с 65-процентным жидким ферросилицием емкостью 3 м³; [1]

– погружение одиночных слитков магния в специальный ковш-реактор емкостью 3 м³ воздействием скрещенных магнитного и электрического полей [2].

По первому варианту приготовление лигатуры сопровождается пироэффектом, а извлечение магния в сплав составляет 50-60%. При этом существенно, что выбросы металла из ковша отсутствуют, а горит на поверхности металла в ковше магний, который не успел раствориться и в жидком виде всплыл на поверхность. Это свидетельствует о том, что расплавление пакета слитков опережает растворение магния по схеме $2Mg + Si \rightarrow Mg_2Si$. Т.е. в этом способе растворение лимитируется массообменом. Отсутствие выбросов из ковша связано с тем, что на перегрев магния до температуры его кипения и испарение требуется гораздо больше тепла, чем на расплавление. За время расплавления и частичного растворения магния в ферросилиции нужное для испарения магния количество тепла не успевает поступить к присадке. Т.е. испарение магния лимитируется теплообменом. Силицид, образующийся в расплаве, в пироэффекте не участвует.

Получение лигатуры вводом одиночных слитков электромагнитным способом не сопровождается пироэффектом, а извлечение магния в сплав составляет 80%. Это свидетельствует о том, что электромагнитной силой удерживается в глубине расплава и твердый, и уже расплавившийся жидкий магний. Его потери (до 20%) связаны с диссоциацией группировок Mg_2Si и испарением магния с поверхности металла. Отсутствие выбросов при вводе магния указывает на то, что испарение магния в глубине металла тоже лимитируется теплообменом. Реагирование магния с кремнием ферросилиция отстает от расплавления, но опережает испарение.

В ходе лабораторных исследований процесса получения ЖКМ лигатуры был установлен механизм погружения слитка магния в расплав ферросилиция под действием скрещенных магнитного и электрического полей.

Известно, что на контактной поверхности холодной присадки погруженной в высокотемпературную жидкую фазу в начальный момент времени намерзает корочка окружающего расплава. Материал присадки начинает поступать в расплав только после оплавления намерзшей на его поверхности корочки за счет подвода тепла из окружающего расплава.

Если на слитке магния образуется корочка ферросилиция, то такая корочка является электрической изоляцией магния. Электросопротивление твердого ферросилиция в несколько раз больше, чем у жидкого. Слиток магния в твердой оболочке ферросилиция не может утяжелиться в скрещенных магнитном и электрическом полях до такой степени, чтобы погрузиться в жидкий расплав.

В действительности слиток магния по лотку падает на поверхность утяжеленного электромагнитным способом расплава плашмя. Через несколько секунд слиток поворачивается в вертикальное положение и «поплавком» погружается в расплав. Картина сопровождается слабым свечением, напоминающим лампу дневного света. Цикл усвоения слитка массой 8,5 кг составляет около 20с. Пироэффект отсутствует. В процессе приготовления лигатуры ток на ванну регулируется с пульта управления и его плотность составляет $(8\div 12) \cdot 10^5$ А/м². Магнитная индукция $\approx 0,5$ Тл. Под действием электромагнитного утяжеления окружающий расплав прокачивается через активное пространство реактора и течет относительно слитка книзу с числом $Re \approx (2\div 4) \cdot 10^4$, критерий Pr у ферросилиция $\approx 0,14$.

Для анализа тепломассообмена в системе $FeSi - Mg$ и объяснения действительно наблюдаемого явления погружения и усвоения слитка под действием скрещенных магнитного и электрического полей использованы сведения о теплофизических свойствах и удельном электросопротивлении Mg , $FeSi - 65$ и лигатуры ЖКМ (5÷10 % Mg) которые представлены в таблице 1, а также взятые из работы [3].

Стандартный слиток магния призматической формы с размерами 500×160×80 мм и массой 8,5 кг, оказавшийся на поверхности расплава, начинает греться.

Коэффициент теплоотдачи в начале нагрева, составляет [4]

$$\alpha_1 = \frac{b_{Mg}}{\sqrt{\pi\tau}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где b_{Mg} – коэффициент теплоаккумуляции магния (таб.1).

При $\tau=0$, $\alpha \rightarrow \infty$, но уже к концу первой секунды контакта слитка с расплавом составляет конечную величину $9,1 \cdot 10^3$ Вт/(м²·К) и в дальнейшем уменьшается обратно пропорционально $\sqrt{\tau}$. Вследствие очень интенсивного теплопоглощения слитком на нем намерзает корочка ферросилиция. (Рис. 1, а).

Таблица 1 – Теплофизические свойства магния, кремния и лигатуры

| Наименование свойств | | Магний металлический | Ферросилиций (65% – Si) | Лигатура ЖКМ |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------|-------------------------|------------------------|
| Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) | $\lambda_{жс}$ | 139 | 11,7 | 12 |
| | $\lambda_{тв}$ | 146 | 23,3 | 25 |
| Теплоемкость кДж/(кг·К) | $C_{ж}$ | 1,07 | 0,84 | 0,86 |
| | $C_{тв}$ | 1,05 | 0,8 | 0,82 |
| Плотность, кг/м ³ | $\rho_{жс}$ | $1,55 \cdot 10^3$ | $4,0 \cdot 10^3$ | $3,8 \cdot 10^3$ |
| | $\rho_{тв}$ | $1,7 \cdot 10^3$ | $3,5 \cdot 10^3$ | $3,4 \cdot 10^3$ |
| Удельная теплота, кДж/кг | плавления | 336 | 546 | 500 |
| | испарения | 5630 | – | Mg частично испаряется |
| | растворения | 1080 в Si | 1850 в Mg | $P_{Mg}=0,75[Mg]$ |
| Температура, °С | ликвидус | 651 | 1240 | 1180 |
| | солидус | 651 | 1208 | 1130 |
| Коэффициент температуропроводности, м ² /с | $\alpha_{жс}$ | $0,85 \cdot 10^{-4}$ | $0,035 \cdot 10^{-4}$ | – |
| | $\alpha_{тв}$ | $0,88 \cdot 10^{-4}$ | $0,083 \cdot 10^{-4}$ | – |
| Коэффициент теплоаккумуляции, кДж/(м ² ·К·с ^{1/2}) | $b_{жс}$ | 15,2 | 3,9 | – |
| | $b_{тв}$ | 16,1 | 8,1 | – |

Слиток и расплав находятся в скрещенных магнитном и электрическом полях. Силовое электромагнитное воздействие на систему составляет расчетную величину, достаточную для погружения более электропроводного магния в ферросилиций, удельное электросопротивление которого больше. Но слиток не погружается сразу. Намерзшая на нем корочка является дополнительным сопротивлением. Через слиток поначалу не проходит ток расчетной величины, определяемый из выражения [2]

$$\frac{B \cdot I}{\rho g S} > \frac{1 - \beta}{1 - \alpha_{y0}},$$

где B – индукция магнитного поля, Тл;

I – сила тока на ванне, А;

S – площадь поперечного сечения ванны, перпендикулярного к направлению тока, м²;

ρ – плотность содержимого ванны, кг/м³;

g – ускорение силы тяжести, м/с^2 ;
 β , $\alpha_{\gamma\delta}$ – отношение плотностей магния и расплава и их удельных электросопротивлений соответственно [3].

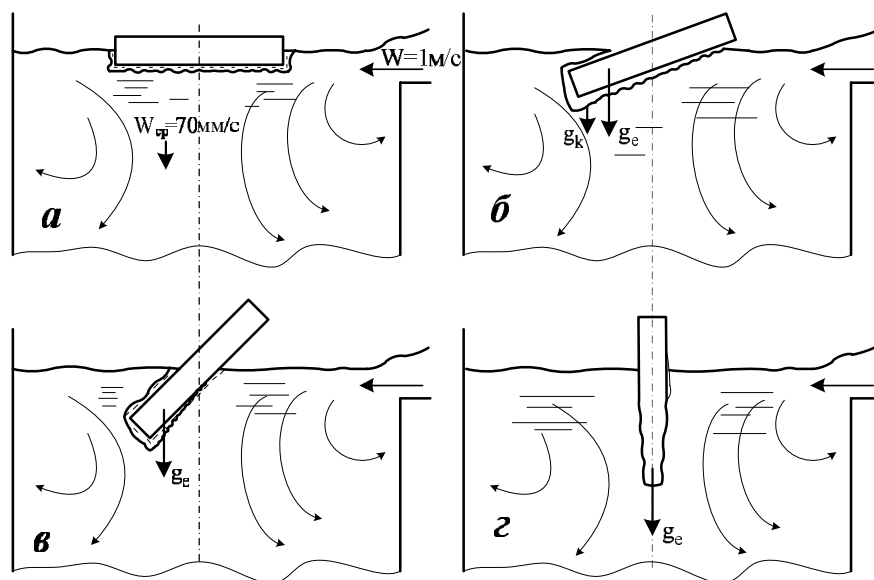


Рисунок 1 – Поведение слитка магния в активной зоне электромагнитного реактора

Циркулирующий через активную зону реактора расплав сильнее обогревает часть слитка, обращенную в сторону миксерной зоны реактора. Корочка в этой части слитка подплавляется. Через несколько секунд после подачи слитка его горизонтальное положение нарушается (рис. 1, б) из-за того, что намерзающая корка толще в противоположной части. Электромагнитное утяжеление более заглубленной части усиливает этот разбаланс, и слиток продолжает поворачиваться (рис. 1, в) до вертикального положения (рис. 1, г) после чего погружается в расплав. Этому способствует также вес выступающей над поверхностью части слитка. Конец погружения слитка сопровождается слабым белым свечением, переходящим в белый дымок. По окончании дымовыделения подают следующий слиток.

Слиток погружается в расплав твердым. Расплавление и растворение магния с выделением тепла происходит в глубине расплава. И твердый, и жидкий магний удерживаются в глубине электромагнитной силой. Поскольку слиток погружен в расплав, то это является свидетельством того, что между расплавом и магнием имеется хороший электрический контакт. Через магний проходит расчетный ток, достаточный для его удержания в глубине. Намерзшая на слитке корка ферросилиция на некоторых участках подплавляется, либо расплавляется полностью в результате теплового потока от расплава. Теплообмен между магнием и ферросилицием

в процессе приготовления ЖКМ – лигатуры характеризуется следующими балансовыми показателями (кДж/кг):

– потери тепла расплавом на разогрев Mg до температуры плавления составляют 642 кДж, на расплавление Mg 368 кДж, на перегрев продуктов реакции от температуры плавления Mg до температуры окружающего расплава 698 кДж;

– приход тепла от химического взаимодействия Mg с Si и образование Mg_2Si 1080 кДж.

В итоге каждый кг Mg охлаждает расплав на 628 кДж (149 ккал). 1% введенного Mg охлаждает расплав на 7 – 8 °С, а с учетом потерь тепла в окружающую среду, эти потери составляют ≈ 10 °С.

Как отмечено выше, при пакетном вводе слитков на штанге массообмен в системе $FeSi - Mg$ отстает от теплообмена. Взаимное растворение Si в Mg и Mg в FeSi происходит преимущественно между жидкими компонентами. При электромагнитном вводе Mg подплавление слитка, в соответствии с решением по данным работы [3] начинается через 3 – 3,5 с после его подачи на поверхность расплава. Критерий плавления у Mg составляет 0,906, что свидетельствует об его плавлении, по крайней мере в начале процесса, как “массивного” в теплотехническом отношении объекта [3]. Подплавляющийся внутри корочки, особенно в углах, Mg растворяет в себе Si из окружающего FeSi и ускоряет оплавление намерзшей корки изнутри. Проходящий по ванне ток деформирует, а магнитным давлением частично дробит жидкие фрагменты Mg. Межфазная поверхность увеличивается, и растворение Mg ускоряется. Согласно расчетам по методике [3], расплавление слитка происходит за 19 с. То есть при электромагнитном вводе слитков Mg в FeSi массообмен и теплообмен проходят с примерно одинаковыми скоростями.

Гидродинамическая обстановка в активной зоне ковша-реактора схематически показана на рисунке 2. Слева из миксерной зоны ковша-реактора в активную зону переливается расплав со скоростью 1 м/с и с расходом $\approx 0,01$ м³/с. В процессе ввода магния изменяется электропроводность ванны. Силу тока и индукцию магнитного поля регулировали, добиваясь расчетной скорости усвоения, магния 2 ÷ 3 слитка в минуту. Расход металла через активную зону незначительно изменяется в одну или другую сторону.

Число Рейнольдса в зоне поступления струи («носовая» часть) $\approx 4 \cdot 10^5$, а для противоположного конца слитка («кормового») $\approx 4 \cdot 10^4$.

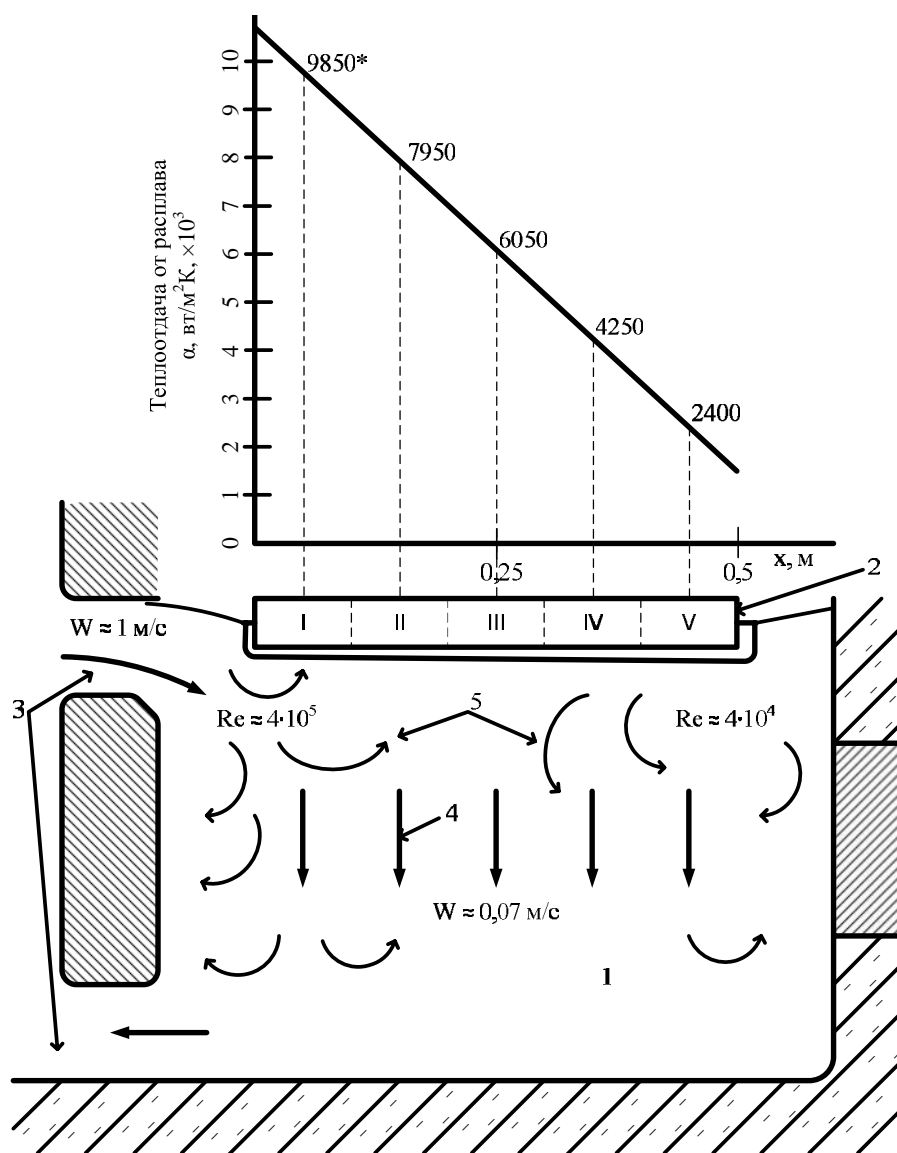
Завихренность металла в ванне $I \cdot l$, $H \cdot m \cdot c$ (I – импульс струи, $H \cdot c$; l – определяющий размер, m) плавно изменяется от максимальной в «носовой» части до минимальной в «кормовой». Соответственно изменяется теплоотдача от расплава к слитку.

Коэффициент теплоотдачи к слитку определяли из выражения [5]:

$$Nu = 4,5 + 0,014(Re \cdot Pr)^{0,8},$$

где $Nu = \alpha \cdot l / \lambda_e$ – критерий Нуссельта;

$Pr = \nu / a_e$ – критерий Прандтля, составляет 0,14.



- 1 – активная зона ковша реактора; 2 – слиток магния;
 3 – переливные каналы; 4 – нисходящий поток металла;
 5 – вихревые потоки

Рисунок 2 – Гидродинамическая обстановка в активной зоне ковша-реактора и теплоотдача по длине слитка магния (* – средние показатели для рассматриваемых участков слитка)

В «носовой» части слитка теплоотдача от расплава к слитку $\alpha \approx 10720 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$, а в «кормовой» $\alpha \approx 1430 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$. Ввиду того, что в начальный момент контакта слитка с расплавом ($\tau = 0$) интенсивность теплообмена очень большая ($\alpha = b_{ТВ} / \sqrt{\pi \cdot \tau} \Rightarrow \infty$, $b_{ТВ}$ – коэффициент теплоаккумуляции слитка, $\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{час}^{1/2})$, составляет 230), на слитке образуется корочка ферросилиция. Теплота кристаллизации передается слитку. В дальнейшем теплота расплава поступает на слиток через эту корочку. Корочка на слитке нарастает до тех пор, пока тепловой поток от кристаллизующейся корки на слиток больше, чем тепловой поток от расплава на наружную поверхность корки. Тепловой поток от кристаллизующейся корки на слиток с течением времени уменьшается обратно пропорционально $\sqrt{\tau}$. Тепловой поток от расплава пропорционален α и во времени постоянен.

Для расчета процесса нарастания корочки и теплообмена между слитком и расплавом определяли коэффициент затвердевания ферросилиция из следующего трансцендентного уравнения, полученного из анализа решения Стефана:

$$\rho_{ж} \cdot L \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot K = b_{ТВ} \cdot \mathcal{G}_{ТВ} \frac{\exp(-K^2/4a_{ТВ})}{G(K/\sqrt{4a_{ТВ}})} - b_{ж} \cdot \mathcal{G}_{ж} \frac{\exp(-K^2/4a_{ж})}{[1 - G(K/\sqrt{4a_{ж}})]},$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкого ферросилиция – $65: 3 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$;

L – удельная теплота кристаллизации ферросилиция: $546 \text{ кДж}/\text{кг}$;

$b_{ТВ}$, $b_{ж}$ – коэффициенты теплоаккумуляции твердого и жидкого ферросилиция, соответственно $50,5$ и $160 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{мин}^{1/2})$;

$$\mathcal{G}_{ТВ} = t_{\text{сол}} - t_{\text{пл. Mg}} = 1208 - 651 = 557 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\mathcal{G}_{ж} = t_{\text{расп}} - t_{\text{сол}} = 1350 - 1208 = 142 \text{ }^\circ\text{C};$$

$a_{ТВ}$, $a_{ж}$ – коэффициенты температуропроводности твердого и жидкого ферросилиция, соответственно $4,35$ и $41,6 \text{ см}^2/\text{мин}$;

$G(x) = \text{erf}(x)$ – табличный интеграл ошибок Гаусса.

Решение данного уравнения, позволило определить для FeSi – 65 коэффициент затвердевания $K = 1,8 \text{ см}/\text{мин}^{1/2} = 2,3 \text{ мм}/\text{с}^{1/2}$.

Затем рассматривали тепломассообмен между слитком Mg массой $8,5 \text{ кг}$ и окружающим расплавом FeSi с учетом гидродинамической обстановки в активной зоне ковша-реактора емкостью 3 м^3 (табл. 2).

Массу корки FeSi, намерзшей на слиток магния (M_k), а также количество тепла поступающее от затвердевшей корки на слиток (Q_k) и от расплава на корку (Q_p) рассчитывали по следующим уравнениям:

$$M_k = \delta \cdot S \cdot \rho_{\text{FeSi}} = K \sqrt{\tau} S \cdot \rho_{\text{FeSi}} = 2,3 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^3 \cdot S \cdot \sqrt{\tau} = 6,9 \cdot S \cdot \sqrt{\tau}, \text{ кг};$$

$$Q_k = M_k \cdot L = 6,9 \cdot S \cdot \sqrt{\tau} \cdot 546, \text{ кДж}; \quad Q_p = L \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot S = 142 \cdot L \cdot S \cdot 10^{-3}, \text{ кДж}.$$

где K – коэффициент затвердевания, $\text{м/с}^{1/2}$;

τ – время от момента попадания слитка в расплав, с;

S – площадь намерзшей корки, м^2 ;

ρ_{FeSi} – плотность ферросилиция, кг/м^3 ;

L – удельная теплота плавления, кДж/кг .

Расчет показывает, что в носовом торце слитка и на первом участке корка перестает нарастать уже на второй-третьей секунде после того, как слиток подан в активную зону. На четвертой секунде прекращается нарастание корки на втором участке (табл. 2), тогда как на IV и V участках корка продолжает нарастать. На I и II участке корка в это время оплавляется, возможно даже смывается со слитка потоком металла. На третьей-четвертой секунде масса IV – V участка с намерзшей коркой тяжелее I – II участка на 200 – 300г. С учетом электромагнитного утяжеления слитка с коркой эти 200 – 300г приобретают дополнительно 16 – 24 Н «кажущегося» веса, что достаточно для выведения слитка из первоначального горизонтального положения. Как только слиток наклоняется в сторону кормы, момент, вызывающий наклон, начинает увеличиваться. Электромагнитное утяжеление действует на погруженную в металл часть слитка. При наклоне слитка масса погруженной части увеличивается в кормовом участке IV – V и уменьшается в носовой части. Соответственно изменяется электромагнитная сила, вызывающая опрокидывающий момент. Слиток поворачивается в вертикальное положение. Условия теплоотдачи от расплава к слитку изменяются. Кормовая часть, опускаясь, попадает в зону большей турбулентности и соответственно теплоотдачи. Происходит дальнейший разогрев погруженной части, что способствует подплавлению корки и слитка. Взаимодействие плавящегося магния с кремнием с выделением тепла ускоряет оплавление намерзшей корки. Сила электромагнитного воздействия увеличивается в результате освобождения слитка от дополнительного электросопротивления в виде корки твердого ферросилиция. Слиток погружается дальше, чему способствует также и выступающая над поверхностью металла его верхняя часть.

Таблица 2 – Тепломассообмен между слитком магния и окружающим расплавом ферросилиция в активной зоне ковша реактора емкостью 3 м³

| Время от момента ввода Mg, с | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------------|-------|-------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------|-------------------------------------|-------|-------|-------|
| Участок слитка магния | | | | | | | | | | | |
| Торец «носовой» части $S=0,00544 \text{ м}^2$ | $M_{\kappa}, \text{ кг}$ | 0,037 | 0,016 | Подплавление и расплавление корочки | | | | | | | |
| | $Q_{\kappa}, \text{ кДж}$ | 20,5 | 8,5 | | | | | | | | |
| | $Q_{\rho}, \text{ кДж}$ | 8,3 | 8,3 | 8,3 | 8,3 | 8,3 | 8,3 | 8,3 | 8,3 | 8,3 | 8,3 |
| I $S=0,022 \text{ м}^2$ $\alpha=9850 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ | $M_{\kappa}, \text{ кг}$ | 0,152 | 0,063 | 0,48 | Подплавление и расплавление корочки | | | | | | |
| | $Q_{\kappa}, \text{ кДж}$ | 82,9 | 34,3 | 26,3 | | | | | | | |
| | $Q_{\rho}, \text{ кДж}$ | 30,1 | 30,1 | 30,1 | 30,1 | 30,1 | 30,1 | 30,1 | 30,1 | 30,1 | 30,1 |
| II $S=0,022 \text{ м}^2$ $\alpha=7950 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ | $M_{\kappa}, \text{ кг}$ | 0,152 | 0,063 | 0,048 | 0,041 | Подплавление и расплавление корочки | | | | | |
| | $Q_{\kappa}, \text{ кДж}$ | 82,9 | 34,3 | 26,3 | 22,3 | | | | | | |
| | $Q_{\rho}, \text{ кДж}$ | 24,8 | 24,8 | 24,8 | 24,8 | 24,8 | 24,8 | 24,8 | 24,8 | 24,8 | 24,8 |
| III $S=0,022 \text{ м}^2$ $\alpha=6050 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ | $M_{\kappa}, \text{ кг}$ | 0,152 | 0,063 | 0,048 | 0,041 | 0,035 | 0,033 | Подплавление и расплавление корочки | | | |
| | $Q_{\kappa}, \text{ кДж}$ | 82,9 | 34,3 | 26,3 | 22,3 | 19,5 | 17,7 | | | | |
| | $Q_{\rho}, \text{ кДж}$ | 18,9 | 18,9 | 18,9 | 18,9 | 18,9 | 18,9 | 18,9 | 18,9 | 18,9 | 18,9 |
| IV $S=0,022 \text{ м}^2$ $\alpha=4250 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ | $M_{\kappa}, \text{ кг}$ | 0,152 | 0,063 | 0,048 | 0,041 | 0,035 | 0,033 | 0,030 | 0,027 | 0,026 | 0,025 |
| | $Q_{\kappa}, \text{ кДж}$ | 82,9 | 34,3 | 26,3 | 22,3 | 19,5 | 17,7 | 16,3 | 16,1 | 15,2 | 14,0 |
| | $Q_{\rho}, \text{ кДж}$ | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 13,2 |
| V $S=0,022 \text{ м}^2$ $\alpha=2400 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ | $M_{\kappa}, \text{ кг}$ | 0,152 | 0,063 | 0,048 | 0,041 | 0,035 | 0,033 | 0,030 | 0,027 | 0,026 | 0,025 |
| | $Q_{\kappa}, \text{ кДж}$ | 82,9 | 34,3 | 26,3 | 22,3 | 19,5 | 17,7 | 16,3 | 16,1 | 15,2 | 14,0 |
| | $Q_{\rho}, \text{ кДж}$ | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 7,5 |
| Торец «кормовой» части $S=0,00544 \text{ м}^2$ | $M_{\kappa}, \text{ кг}$ | 0,037 | 0,016 | 0,012 | 0,010 | 0,009 | 0,008 | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,006 |
| | $Q_{\kappa}, \text{ кДж}$ | 20,5 | 8,5 | 6,5 | 5,5 | 4,8 | 4,4 | 4,0 | 3,8 | 3,5 | 3,2 |
| | $Q_{\rho}, \text{ кДж}$ | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 |

После полного погружения слитка в расплав происходит его расплавление и растворение в циркулирующем через активную зону ферросилиция. Визуально об этом свидетельствует свечение активной зоны, сменяющееся дымовыделением. Продолжительность всего процесса составляет около 20 секунд. Отсутствие пироэффекта объясняется тем, что процесс растворения магния с образованием силицида опережает разогрев магния до температуры кипения и подвод к магнию количества тепла, достаточного для его испарения.

Силицид Mg_2Si плавится конгруэнтно при 1085 – 1100 °С и растворяется в ферросилиции. Mg_2Si в пироэффекте не участвует. Под действием электромагнитного утяжеления кажущийся удельный вес магния больше, чем у ферросилиция. Нерастворившийся жидкий магний не всплывает, следовательно, не горит на поверхности и не создает пироэффекта.

Свечение активной зоны объясняется диссоциацией в расплаве группировок Mg_2Si и испарением продиссоциировавшего магния с поверхности расплава. Испаряющийся магний в окислительной для него окружающей среде сгорает, образуя свечение. Растворение плавящегося магния ускоряется под действием турбулентности ванны и под действием проходящего через него электрического тока. Сжимающее действие тока дробит жидкие фрагменты магния, увеличивая межфазную поверхность, ускоряет растворение магния.

Проведенный анализ показывает, что на слитке магния действительно намерзает корка ферросилиция. Эта корка вызывает замедленное по сравнению с расчетным погружение слитка в расплав в положении поплавок. Расплавление слитка из-за намерзания корки не замедляется и практически совпадает с расчетным. Под действием скрещенных магнитного и электрического полей в системе магний-ферросилиций ускоряется массообмен за счет турбулентности в расплаве и пинч-эффекта от проходящего по ванне тока.

Библиографический список

1. Желтов Д.Д. и др. «Опробование производства кремнийтитаномагниевого лигатуры» / Желтов Д.Д., Солошенко В.П., Лихачев А.Г., Ерко В.И., Пекарский Л.Ф. – «Сталь», №3, 1984, с.31-32.

2. Эссельбах С.Б. и др. «Погружение магния в расплав ферросилиция электромагнитной силой»/Эссельбах С.Б., Теплицкий Е.Б., Кислицын В.А., Ерко В.И., Лихачев А.Г., Солошенко В.П.– Бюл. ЦНИИ и ТЭИЧМ, вып. 6 (1082), 1989 г. –51-2-52 с.

3. Ватолин Н.А., Ухов В.Ф., Сафронов С.О. «Исследование электросопротивления и вязкости расплавов на основе кальция, кремния и

магния». Труды XVI совещания по теории литейных процессов. М. Наука 1974 с.24-28.

4. Гольдфарб Э.М. «Теплотехника металлургических процессов» М. Мет. 1967, 439 с.

5. Минаев А.М., Шипилин Б.И. Литейные печи и сушилка. М.: – МАШГИЗ. 1959. – 472 с.

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