

Г.А.Андриевский*Институт черной металлургии НАН Украины им.З.И.Некрасова***ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАВЛЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ФАЗ «ШЛАК – МЕТАЛЛ» ЛЕГКОПЛАВКИХ И ТУГОПЛАВКИХ КУСКОВЫХ ДОБАВОК**

Разработана математическая модель процессов плавления на границе раздела фаз «шлак – металл» легкоплавких и тугоплавких кусковых добавок сферической формы диаметром 25 и 50 мм. В качестве легкоплавкой добавки в расплав рассмотрен ферросилиций марки ФС65, а тугоплавкой – ферротитан марки ФТи30. Установлено, что плавление куска на границе раздела фаз «шлак – металл» более продолжительно, чем в глубине металлической ванны независимо от вида ферросплава

Ключевые слова: математическое моделирование, расплав, плавление, сферический кусок, ферросилиций, ферротитан

Состояние вопроса. Разработка математических моделей, позволяющих изучать процессы плавления кусковой добавки (куска) различного состава, формы и свойств, которые используются при производстве стали, является актуальной научно–технической задачей. К настоящему моменту достаточно полно рассмотрены условия, когда кусок плавится в объеме расплава [1]. В частности, имеются соответствующие экспериментальные данные для таких условий [2]. В тоже время, условия плавления куска на границе раздела фаз «шлак – металл» еще недостаточно изучены. Наличие соответствующего математического аппарата позволит осуществить прогноз усвоения куска в зависимости от условий ввода в металлический расплав и сформировать направления поиска в повышении эффективности использования не только дорогостоящих отечественных, но и импортруемых ферросплавов.

Цель работы. Целью настоящей работы являлась разработка математической модели процессов движения и плавления тугоплавкого и легкоплавкого кусков ферросплавов сферической формы на границе раздела фаз «шлак – металл» и исследование с ее использованием продолжительности указанных процессов.

Описание математической модели

Движение куска при вводе в заполненный сталеразливочный ковш

Движение куска состоит из трех этапов (рис. 1): движение в воздухе до встречи с поверхностью расплава; проникновение в расплав (удар и переход через свободную поверхность); движение внутри расплава. Первый и второй этапы кратковременны. Проникновение куска через свободную поверхность расплава приводит к уменьшению его скорости. Полагаем, что кусок свободно падает вниз на поверхность жидкого шлака или металла. Скорость его у поверхности расплава вычисляется по формуле:

$$v'_0 = v' + \sqrt{2g(h' + H - h_0)}, \quad (1)$$

где: h' – расстояние от торца направляющего желоба до поверхности

расплава в ковше, м;

h_0 – уровень наполнения ковша, м;

H – максимальный верхний уровень расплава в ковше.

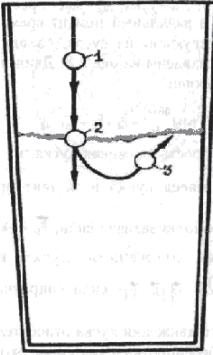


Рис. 1. Схема движения куска ферросплава при вводе его в ковш. Движение куска при вводе его в ковш:

1 – движение в воздухе;

2 – проникновение в расплав через слой шлака;

3 – движение внутри расплава и всплытие на границу раздела фаз «шлак – металл».

Математическая модель движения куска

Процесс погружения и всплытия куска в шлаковом или металлическом расплаве изображен на рис. 2 и описывается уравнением движения следующего вида:

$$W \cdot \rho \frac{dV(\tau)}{d\tau} = -\frac{\rho_{ж.с.} \cdot C_x \cdot S}{2} \cdot V^2 + g(\rho_{ж.с.} - \rho) \cdot W, \quad (2)$$

где: W – объем куска;

ρ – плотность куска;

V – линейная скорость погружения или всплытия;

$\rho_{ж.с.}$ – плотность жидкой стали;

C_x – аэродинамический коэффициент сопротивления;

S – площадь миделевого сечения куска;

g – ускорение свободного падения.

Приравнивая к нулю левый член уравнения (2), значение скорости V_B при всплытии куска в металлическом расплаве определяем по формуле:

$$V_B = \sqrt{\frac{2g(\rho_{ж.с.} - \rho) \cdot W}{\rho_{ж.с.} \cdot C_x \cdot S}} \quad (3)$$

Уравнение (2) имеет аналитическое решение при условии постоянных значений W и S . Так как при движении куска в расплаве его объем и

площадь поперечного сечения изменяются, то получить аналитическую зависимость скорости и глубины погружения невозможно. Поэтому для решения уравнения (2) применяется разностный метод.

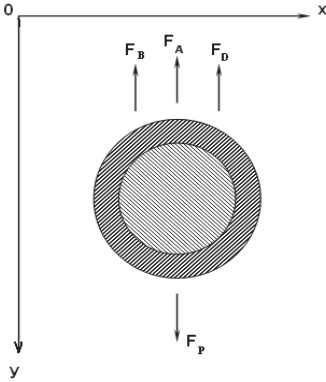


Рис.2. Расчетная схема движения куска ферросплава в расплаве.

ОХ – координатная ось, определяемая уровнем поверхности металла в ковше;

ОУ – координатная ось, совпадающая с осью симметрии ковша;

F_A – выталкивающая сила;

F_B – сила сопротивления;

F_D – сила, обусловленная движением куска в жидкости;

F_P – вес куска.

Уравнение (2) заменяется на разностное уравнение явного вида:

$$W^n \cdot \rho^n \frac{V^{n+1} - V^n}{\Delta \tau_r} = - \frac{\rho_{ж.с.} \cdot C_x \cdot S^n}{2} (V^n)^2 + g(\rho_{ж.с.} - \rho^n) W^n \quad (4)$$

Значения объема W^n , плотности ρ^n и миделевого сечения S^n на каждом шаге по времени $\Delta \tau_r$ определяются по формулам:

$$W^n = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (R + Z_2^n)^3; \quad (5)$$

$$\rho^n = \frac{4}{3} \cdot \frac{\pi}{W^n} \cdot \{ \rho_T (R - Z_1^n)^3 + \rho_{ж} [R^3 - (R - Z_1^n)^3] + \rho_c [(R + Z_2^n)^3 - R^3] \} \quad (6)$$

$$S^n = \pi(R + Z_2^n)^2; \quad (7)$$

Значение V_B^n в разностной форме имеет вид:

$$V_B^n = \sqrt{\frac{2g(\rho_{ж.с.} - \rho^n)W^n}{\rho_{ж.с.} \cdot C_x \cdot S_n}}; \quad (8)$$

Шаг по времени $\Delta \tau_r$ для решения уравнения (4) выбирается из численного эксперимента. Установлено, что шаг необходимо выбирать таким образом, чтобы приращение пути для любого Δx^n не превышало 1 см.

Например, для начальной скорости погружения 100 м/с значение $\Delta\tau_r = 10^{-4}$ с.

Результаты исследования и их анализ

Движение куска при вводе в заполненный сталеразливочный ковш

С использованием математической модели были произведены расчеты движения ферросилиция марки ФС65 и ферротитана марки ФТи30 при вводе их в сталеразливочный ковш емкостью 250 т применительно к условиям конвертерного цеха ПАО "Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф.Э. Дзержинского". Использовались следующие исходные данные: размер (диаметр) куска в поперечном сечении – 25 и 50 мм, высота падения куска (от торца направляющего желоба установки ковш–печь (УКП) до поверхности расплава в ковше) – 2,5 м, толщина слоя шлака в ковше – 140 мм, температура металлического расплава – 1550, 1600 и 1650⁰С. Принятые данные по фракционному составу исследуемых кусков, высоте падения куска, толщине слоя шлака и температуре расплава являются характерными для рассматриваемых условий производства стали.

Ниже представлены результаты исследования движения куска. Показано (рис.3), что вследствие меньшей плотности ферросилиция по сравнению с ферротитаном, скорость его внедрения в металлическую фазу расплава меньше. Увеличение фракции куска, независимо от вида рассматриваемого ферросплава, способствует увеличению скорости его входа.

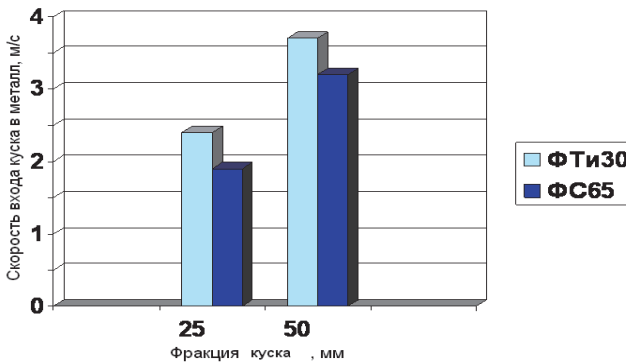


Рис.3. Скорость куска в момент соприкосновения с расплавом.

При заглублиении куска в металлический расплав на его поверхности намерзает металлическая корка. Из рис.4 следует, что толщина намерзшей металлической корки на куске ферротитана больше, чем на куске ферросилиция. Это, по–видимому, связано с разными теплофизическими свойствами материалов. С увеличением фракции куска, независимо от вида ферросплава, толщина намерзшей корки металла уменьшается.

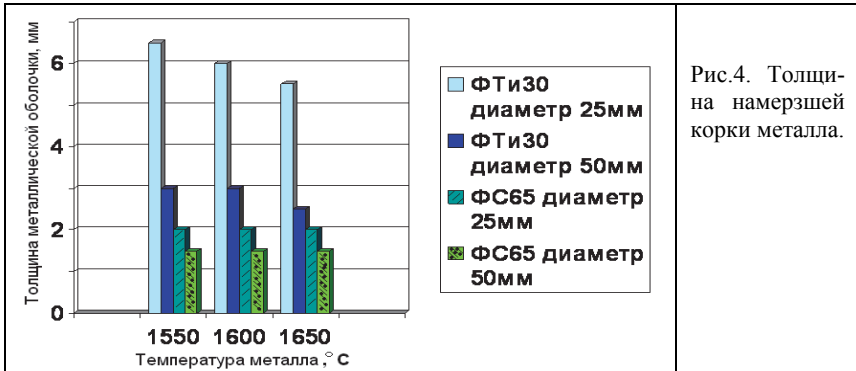


Рис.4. Толщина намерзшей корки металла.

Данные рис.5 свидетельствуют о том, что кусок ферротитана погружается глубже в расплав, ввиду его большей плотности по сравнению с ферросилицием. Незначительному увеличению глубины погружения способствует увеличение фракции куска. Скорость всплытия куска на границу раздела фаз определяется плотностью материала и действующей на него выталкивающей силы (рис.6).

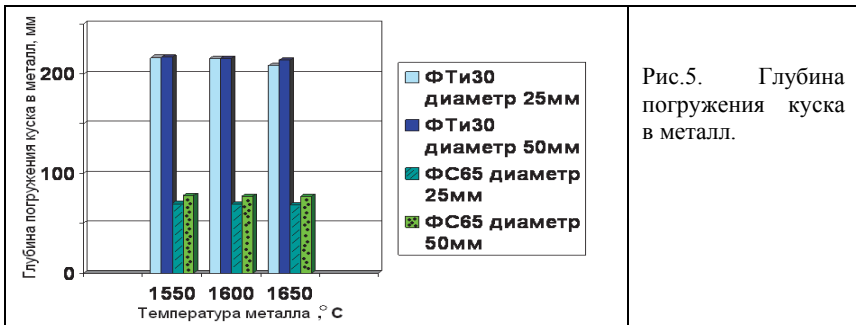


Рис.5. Глубина погружения куска в металл.

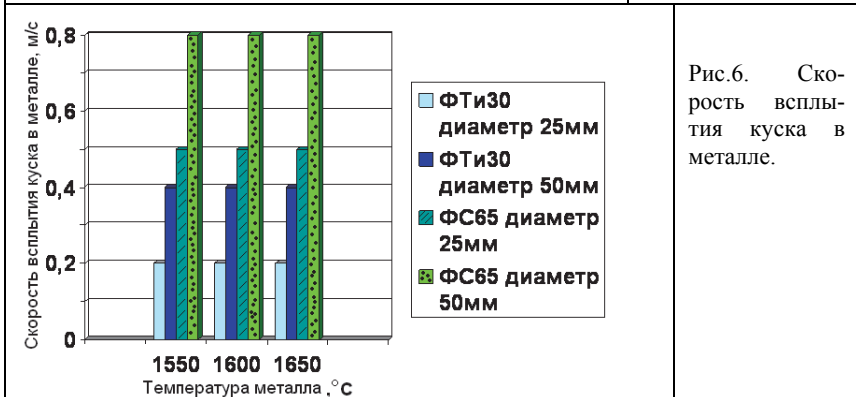


Рис.6. Скорость всплытия куска в металле.

Ниже (рис.7,8) приведены результаты оценки продолжительности движения куска в расплаве. Данные рис.7,8 подтверждают результаты оценки скорости движения куска в расплаве. Приведенные выше данные показывают, что менее плотный ферросилиций проникает в металлический расплав с меньшей скоростью, на меньшую глубину, чем ферротитан и быстрее всплывает. При этом толщина намерзшей корки металла сравнительно меньше.

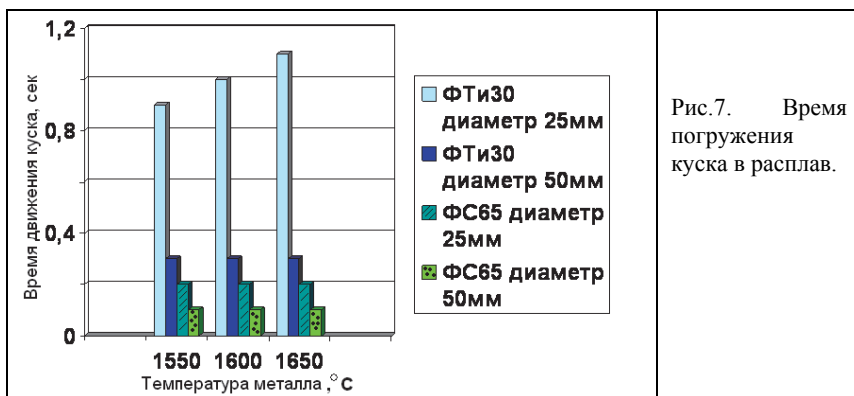


Рис.7. Время погружения куска в расплав.

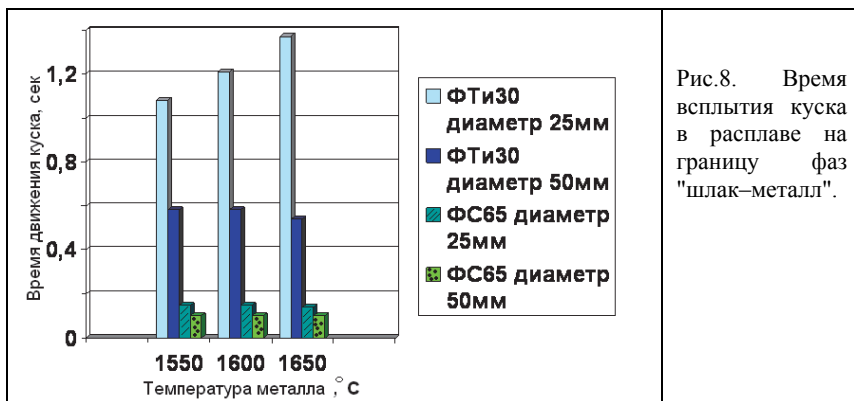


Рис.8. Время всплытия куска в расплаве на границу фаз "шлак-металл".

Плавление куска из легкоплавкого и тугоплавкого материала на границе раздела фаз «шлак-металл»

С учетом полученной толщины намерзшей металлической корки (рис. 4) выполнены расчеты продолжительности плавления куска исследованного ферросплава на границе фаз "шлак-металл". В расчетах учтена скорость обтекания куска жидким металлом – 0,04, 0,1, 1 м/с, что соответствует различным практическим условиям перемешивания ванны во вре-

мя обработки металла на УКП. В настоящих исследованиях использована математическая модель процесса плавления, представленная в работах [3, 4].

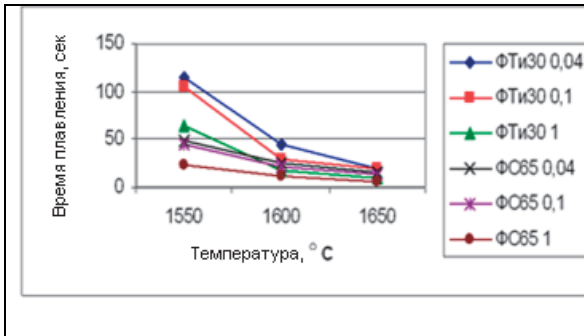


Рис.9. Продолжительность плавления куска разных составов фракцией 25 мм. 0,04, 0,1 и 1 – принятые скорости обтекания куска металлом, соответствующие различным режимам перемешивания расплава (м/с)

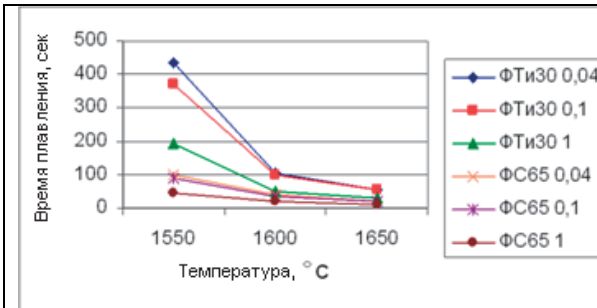


Рис.10. Продолжительность плавления куска разных составов фракцией 50 мм. Обозначения аналогично рис.9.

Из рис. 9, 10 следует, что продолжительность плавления ферротитана больше чем ферросилиция. С увеличением диаметра куса продолжительность его плавления увеличивается. Чем выше скорость обтекания куса расплавом, тем меньше его время плавления. С увеличением температуры расплава плавление происходит быстрее.

Результаты выполненных исследований и сопоставление с соответствующими данными для аналогичных ферросплавов, плавящихся в объеме ванны [2], свидетельствуют о более продолжительном (приблизительно в 2 раза) процессе их плавления на границе раздела фаз «шлак – металл».

Выводы.

1. Разработана математическая модель и использована для описания процессов движения и плавления куса легкоплавкого и тугоплавкого ферросплава сферической формы на границе раздела фаз «шлак – металл».

2. Установлено, что плавление куса на границе раздела фаз «шлак – металл» более продолжительно, чем в глубине металлической ванны независимо от вида ферросплава.

3. Подтверждено влияние теплофизических свойств ферросплавов на условия плавления на границе раздела фаз «шлак – металл».

1. *Математическое* моделирование процессов внеагрегатной обработки стали. / В.А.Вихлевщук, А.П.Огурцов, И.А.Павлюченко, Г.Н.Черномаз. – Киев: ИСМО МО Украины, 1997. – 151 с.
2. *Изучение* свойств ферросплавов и лигатур для микролегирования и раскисления стали. / В.С.Игнатьев, В.А.Вихлевщук, В.М.Черногрицкий др. // Известия вузов. Черная металлургия. – 1988.–№5. – С 37 – 42.
3. *Исследование* кинетики плавления легкоплавких кусковых добавок на границе раздела фаз «шлак – металл»/ И.А.Павлюченко, В.П.Пиптюк, И.Н.Логозинский и др.// Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.– 2011.– Вып. 24.– С.122–135.
4. *Математическое* и программное обеспечение расчета процесса плавления на границе шлак–металл сферы из тугоплавкого материала. / И.А.Павлюченко, Е.В.Сало, В.П.Пиптюк и др.// Системные технологии. – 2010.– №4 (69).– С.122–127

*Статья рекомендована к печати
докт. техн. наук проф. В.Ф.Поляковым*

Г.А.Андрієвський

Дослідження плавлення на кордоні розділу фаз «шлак - метал» легкоплавких і тугоплавких кускових добавок

Розроблено математичну модель процесів плавлення на межі розділу фаз «шлак - метал» легкоплавких і тугоплавких кускових добавок сферичної форми діаметром 25 і 50 мм. В якості легкоплавкої добавки в розплав розглянуто феросиліцій марки ФС65, а тугоплавкої - ферротитан марки ФТі30. Встановлено, що плавлення шматка на межі розділу фаз «шлак - метал» більш тривало, ніж у глибині металевої ванни незалежно від виду феро-сплаву.