

УДК 669.154:621.78.061:66.015.23

В. Л. Найдек, А. В. Наривский, Н. С. Пионтковская

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССООБМЕНА ПРИ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ПОТОКЕ

Представлены результаты интенсивного массообмена в расплаве при разных способах вакуумно-плазменной обработки его в промежуточном ковше.

Ключевые слова: плазменная струя, моделирующая жидкость, вакуумная камера, массообмен, промежуточный ковш.

Подано результати інтенсивного масообміну в розплаві при різних способах вакуумно-плазмової обробки його в проміжному ковші.

Ключові слова: плазмовий струмінь, моделююча рідина, вакуумна камера, масообмін, проміжний ківш.

The results on intensity of mass-exchange in the melt at different procedures of the vacuum-plasma treatment of it in the intermediate ladle are described.

Keywords: plasma jet, modeling fluid, vacuum chamber, mass-exchange, intermediate ladle.

Современные промежуточные ковши МНЛЗ являются металлургическими агрегатами непрерывного действия, в которых рафинируют металл в потоке и легируют сплавы. Вместе с этим при непрерывности процессов разливки сплавов возникают дополнительные требования к массопереносу газов, вредных примесей и легирующих элементов в расплаве. Это обусловлено малым временем взаимодействия вводимых реагентов с жидким металлом при прохождении его через промежуточные устройства. Для повышения эффективности операций рафинирования и легирования сплавов газореагентную обработку металла в промковшах необходимо проводить достаточно интенсивно.

В Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины созданы эффективные технологии обработки сплавов, основанные на глубокой продувке плазменной струей расплава в вакууме [1-9]. В этих процессах герметизацию вакуумной камеры осуществляют жидким металлом, который рафинируют. Новые технические решения позволяют с помощью простого оборудования проводить вакуумно-плазменную обработку сплавов и нагревать металл при непрерывной разливке по различным схемам (рис. 1).

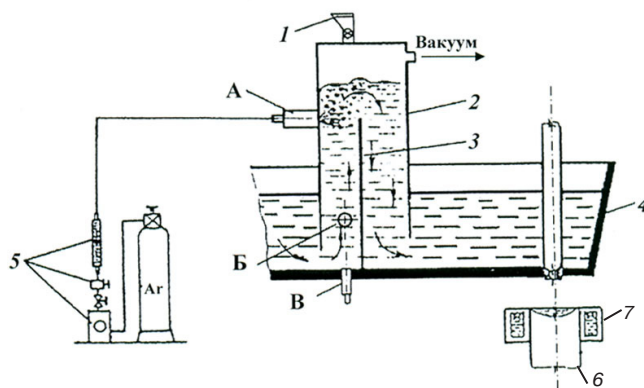
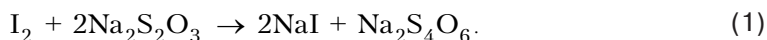


Рис. 1. Схема вакуумно-плазменной обработки сплавов при непрерывной разливке металла: 1 – дозатор для ввода реагентов, 2 – вакуумная камера, 3 – перегородка, 4 – ковш, 5 – система подачи газов в плазмотрон, 6 – слиток, 7 – кристаллизатор; А, Б, В – варианты размещения плазмотрона

Вакуумная камера разделена перегородкой на две полости. В одну из них (полость нагнетания) расплав поступает из промковша и при вакуумировании перетекает над перегородкой в сливную полость. Из сливной полости металл, обработанный плазменной струей в вакууме, перемещается в разливочную зону промежуточного ковша.

Вакуумно-плазменную обработку расплава проводят следующим образом. Камеру вместе с перегородкой заглубляют в жидкий металл и создают вакуум. Под действием вакуума металл в камере поднимается на определенную высоту, которая зависит от величины разрежения. Необходимые для обработки сплавов реагенты предварительно помещают в дозатор и подают в камеру при вакуумировании металла. Реагенты в вакууме не окисляются и поступают в интенсивно перемешиваемые нагретым газом верхние слои расплава. Плазмотрон размещают в днище промежуточного ковша или устанавливают его на разной высоте камеры (см. рис. 1). В данной работе представлены результаты по интенсивности массообмена в расплаве при разных способах продувки его плазменной струей аргона в вакууме.

Массообменные процессы в жидкометаллической ванне при вакуумно-плазменной обработке расплава изучали с применением методик [10, 11]. Интенсивность массообмена в расплаве при моделировании оценивали по скорости реакции взаимодействия йода с тиосульфатом натрия. В качестве моделирующей жидкости использовали раствор йода в воде, имеющий красно-коричневый цвет. При вводе в ванну тиосульфата натрия жидкость осветляется. При изменении интенсивности перемешивания жидкости газовой струей тиосульфат натрия с разной скоростью распределяется по объему ванны и взаимодействует с йодом по следующей реакции:



Для исключения влияния стадии растворения тиосульфата натрия на результаты исследования его подавали в моделирующую среду в виде насыщенного раствора в воде. Скорость протекания реакции (1) оценивали по времени, за которое моделирующая среда обесцвечивалась и становилась прозрачной.

Инерционные силы струи оказывают основное влияние на массообмен в расплаве при продувке газом. Поэтому при исследовании массообмена в жидкости определяющим параметром был принят модифицированный критерий Архимеда

$$Ar_M = \frac{\omega_r^2 \rho_r}{g d \rho_{ж}}, \quad (2)$$

где ω – скорость истечения струи газа, м/с; d – диаметр сопла, м; $\rho_r, \rho_{ж}$ – соответственно плотность газа и жидкости, кг/м³; g – ускорение силы тяжести, м/с².

Решение поставленной задачи при моделировании сводилось к установлению критериальной зависимости

$$Fu_d = f(Ar_M), \quad (3)$$

где $Fu_d = v \frac{\tau}{d^2}$ – динамический критерий Фурье, который для удобства расчетов использовали в виде

$$Fu_d = \frac{v \tau \omega_r}{Q_r}, \quad (4)$$

где v – кинематическая вязкость жидкости, м²/с; τ – время, с; ω_r – скорость газа на выходе из сопла, м/с; Q_r – расход газа, м³/с.

Массообмен в моделирующей среде при разных режимах обработки изучали на прозрачном стенде из оргстекла, размеры которого в 10 раз меньше, чем габариты 40-тонного промковша МНЛЗ. Конструкция стенда позволяла изменять ширину сливной полости в камере и размещать плазмотрон на разной глубине вакуумируемой жидкости. Тиосульфат вводили через металлическую трубку ($\varnothing_{вн} = 3$ мм) с помощью резиновой груши в реакционную зону, которая образуется в жидкости при продувке плазменной струей.

Исследования проводили при одинаковых электрических параметрах плазмотрона ($I = 250$ А; $U = 40$ В), постоянных скорости разливки металла (расход жидкости из промежуточного ковша) и разрежении в вакуумкамере ($\approx 5,4$ КПа). Для расхода аргона 5-21 л/мин через плазмотрон с соплом диаметром 2 мм рассчитывали величину Ar_M . По скорости плазменной струи и времени обесцвечивания моделирующей жидкости определяли значения Fu_d . Чем меньше величина зависимости $Fu_d = f(Ar_M)$, тем интенсивнее массообмен в расплаве при вакуумно-плазменной обработке.

Результаты по интенсивности массообмена (таблица) свидетельствуют о том, что при продувке ванны плазмотроном, установленным в днище промковша (рис. 2, схема А), время обесцвечивания вакуумируемой жидкости при разном расходе аргона изменяется от 4 до 31 с (таблица). В случае продувки ванны горизонтальной плазменной струей, поступающей в жидкость из нижней части камеры (схема Б), массообменные процессы в камере протекают более интенсивно (кривая Б). Время, за которое моделирующая жидкость становится прозрачной при такой обработке, составляет 3-24 с.

Время обесцвечивания вакуумируемой жидкости при разном расходе аргона через плазмотрон

Расход газа, л/мин	Значения критерия Архимеда	Время, с		
		t_A	t_B	t_B
5	242	31	24	49
10	863	12	9	21
16	1867	6	5	11
21	3386	4	3	7

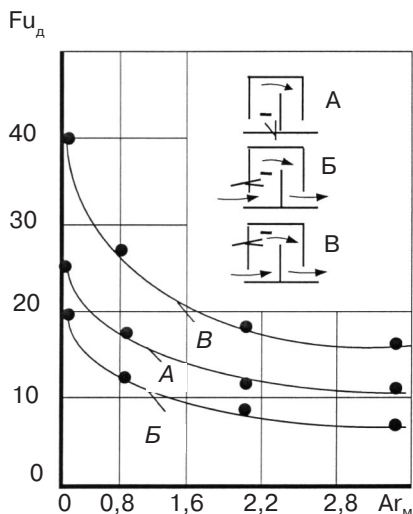


Рис. 2. Изменение интенсивности массообмена при различных схемах плазменной обработки

Повышенная интенсивность массообмена, по сравнению с первым режимом продувки ванны, достигается за счет увеличенных зоны взаимодействия горизонтальной струи с жидкостью и степени дробления газа на пузырьки в ней (рис. 3). Наблюдения показали, что при разной глубине истечения плазменной струи максимальное перемешивание и турбулизация расплава происходят у поверхности ванны. Поэтому после ввода тиосульфата натрия в моделирующую жидкость, независимо от режима ее обработки, в первую очередь, обесцвечиваются поверхностные слои ванны.

При обработке вакуумируемого расплава плазменной струей, истекающей в нижних слоях камеры, массообменные процессы в ванне протекают достаточно интенсивно. Однако для реализации в производстве таких способов обработки сплавов плазмотрон необходимо размещать в проковше под уровнем металла.

При этом, во-первых, нарушается конструкция промежуточного ковша и усложняется монтаж плазматрона. Во-вторых, плазмотрон постоянно будет находиться в жидком металле. С целью исключения затекания металла в плазмотрон необходимо непрерывно через него подавать газ. Наряду с указанным, газовые пузырьки при подъеме из глубины ванны сливаются в более крупные объемы. В результате этого уменьшается поверхность газореагентного взаимодействия в расплаве. Крупные пузырьки газа при достижении поверхности ван-

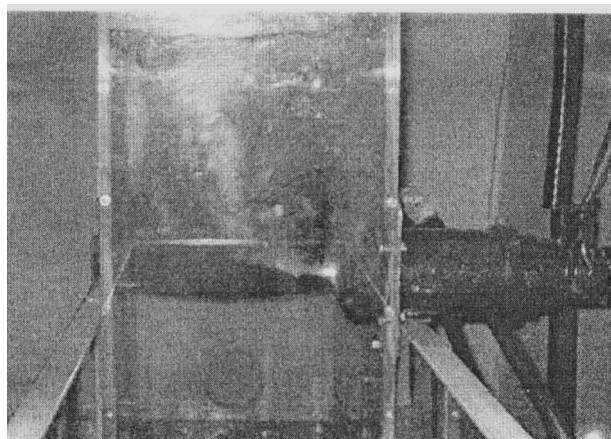


Рис. 3. Зона взаимодействия горизонтальной плазменной струи с жидкостью

ны разрушаются с интенсивным брызгообразованием и намораживанием металла на стенки в вакуумной камере.

Устранить указанные недостатки позволяет вакуумно-плазменная обработка жидкого металла по схеме В (рис. 2). Высокотемпературная струя газа поступает в жидкость из плазматрона, установленного в верхней части вакуумной камеры над промежуточным ковшом. В этом случае газовые пузырьки, образующиеся в реакционной зоне струи, не успевают слиться в крупные и газореагентное взаимодействие происходит на большой поверхности раздела фаз. Поэтому осветленная жидкость при такой обработке начинает поступать в сливную полость вакуумной камеры через 1,0-1,5 с после ввода тиосульфата в ванну. При этом полное осветление моделирующей жидкости во всем объеме достигается за более длительный (7-49 с) период по сравнению с продувкой ее струями, истекающими в нижних частях ванны. Обусловлено это низкими скоростями массопереноса йодистого раствора в зону взаимодействия его с тиосульфатом, введенным в верхнюю часть камеры. Йодистый раствор из нижних слоев ванны до контакта с тиосульфатом поступает

за счет движения его вверх по полости нагнетания без перемешивания и транспортирования жидкости газом.

Замедленный массообмен во всем объеме расплава при обработке его по схеме В на эффективность рафинирования сплавов не влияет. Для получения качественных заготовок необходимо обеспечить поступление в зону разлива промковша расплава, очищенного от газов и включений. Это и достигается с самого начала обработки металла таким способом. Также известно, что вакуум, даже при высоком разрежении в камере, распространяется на глубину металлических расплавов не более 50 мм. При продувке плазменной струей поверхностных слоев металла повышается эффективность вакуумирования сплавов. Следует ожидать, что флюс (шлак), поданный с помощью дозатора (см. рис. 1) на поверхность расплава, будет интенсивно взаимодействовать с восходящими газометаллическими потоками, нагреваемыми плазменной струей на большой межфазной поверхности. При этом флюс будет нагреваться и хорошо ассимилировать неметаллические включения и примеси, находящиеся в металле.

Представленные результаты дополняют имеющиеся данные о газореагентном взаимодействии в расплавах и могут быть использованы при разработке новых технологий рафинирования и легирования сплавов в потоке с плазменным нагревом металла в промежуточных ковшах и устройствах.



Список литературы

1. Пат. 69091А Украина, МПК С22В 9/04. Способ обработки жидкого металла / В. Л. Найдек, А. В. Наривский, Н. С. Ганжа и др. – 2004, Бюл. № 8.
2. Пат. 75166 Украина, МПК С21С 7/10, С22В 9/00. Вакуумно-плазменная установка для обработки металлических расплавов / В. Л. Найдек, А. В. Наривский, Ю. П. Ленда и др. – 2006, Бюл. № 3.
3. Пат. 75829 Украина, МПК С22В 9/00 Н05Н 1/26. Способ вакуумно-плазменной обработки сплавов / В. Л. Найдек, А. В. Наривский, В. И. Курпас и др. – 2006, Бюл. № 5.
4. Пат. 75830 Украина, МПК С21С 7/10. Способ непрерывного вакуумирования жидкого металла / В. Л. Найдек, А. В. Наривский, Р. Я. Якобше и др. – 2006, Бюл. № 5.
5. Пат. 85988 Украина, МПК С22В 9/05. Способ вакуумно-плазменной обработки расплавленного металла / В. Л. Найдек, А. В. Наривский, Н. С. Ганжа и др. – 2009, Бюл. № 5.
6. Пат. 90389 Украина, МПК С21С 7/00, 7/10; С22В 9/00. Способ обработки жидкого металла в ковше и устройство для его реализации / В. Л. Найдек, А. В. Наривский, С. Г. Мельник и др. – 2010, Бюл. № 8.
7. Пат. 96470 Украина, МПК В22Д 1/00; 27/04; 27/15. Способ плазменно-реагентной обработки металлического расплава в вакууме / А. В. Наривский, В. Л. Найдек, Н. С. Ганжа и др. – 2011, Бюл. № 21.
8. Пат. 96962 Украина, МПК С22В 9/05, С21С 7/10, Н05Н 1/26. Способ вакуумно-плазменной обработки жидкого металла в потоке / В. Л. Найдек, А. В. Наривский, С. Г. Мельник и др. – 2011, Бюл. № 24.
9. Пат. 98903 Украина, МПК С21С 7/10, С22В 9/04. Способ рафинирования сплавов от примесей / А. В. Наривский, В. Л. Найдек, В. В. Федоров и др. – 2012, Бюл. № 12.
10. Пат. 2022987 Россия, МПК С09В 23/24. Устройство для моделирования металлургических систем / А. В. Наривский, В. Л. Найдек, В. А. Переломы и др. – 1994, Бюл. № 21.
11. Наривский А. В. Исследование массообмена в расплаве при обработке заглубленной плазменной струей // Пробл. спецэлектрометаллургии. – 1991. – № 4. – С. 62-65.

Поступила 24.09. 2012