

В.Н. Селиванов, Э.В. Дюльдина, Е.П. Лозовский, А.В. Коротин

Магнитогорский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ШЛАКООБРАЗОВАНИЯ В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ МНЛЗ

Аннотация. Проведено исследование шлакообразования в промежуточном ковше машины непрерывного литья заготовок при разливке плавов низкоуглеродистой и низколегированной стали массой 360 т. Установлено, что при разливке серии из 5 – 10 плавов происходит существенное увеличение массы и изменение химического состава шлака. Ключевую роль в этом процессе играет поступление в шлак неметаллических включений, всплывающих из разливаемой стали. При разливке низкоуглеродистой стали масса всплывших неметаллических включений составляет около 30 % от массы конечного шлака, а при разливке низколегированной стали – около 50 %. Значительно меньшую роль в изменении химического состава шлака играет растворение огнеупорной футеровки: 4 – 5 % от массы конечного шлака при шамотной и 14 – 15 % при магнезильной футеровке. Изменение химического состава шлака приводит к повышению температуры его плавления на 80 – 140 °С.

Ключевые слова: сталь, непрерывная разливка, промежуточный ковш, шлак, химический состав, шлакообразование, футеровка, неметаллические включения.

INVESTIGATION OF SLAG FORMATION IN TUNDISH OF CONTINUOUS CASTER

Abstract. The investigation of slag formation in tundish of continuous caster for casting melting low-carbon and low-alloy steel weighing 360 tons is executed. It is found that the casting series of 5 – 10 melts there is a significant increase in weight and the chemical composition of the slag. A key role in this process is the flow of the slag inclusions, pop out of bottled steel. For casting low carbon steel weight surfaced inclusions is about 30 % by weight of the final slag, and the casting alloy steel – about 50 %. A much smaller role in the chemical composition of the slag is dissolved refractory lining: 4 – 5 % by weight of the final slag for chamotte brick lining and 14 – 15 % for magnesite lining. The changes in the chemical composition of the slag raises its melting temperature at 80 – 140 °C.

Keywords: steel, continuous casting, tundish, slag, chemical composition, slag formation, lining, non-metallic inclusions.

При непрерывной разливке стали в промежуточный ковш периодически вводятся шлакообразующие смеси (ШОС) для получения шлака, выполняющего функции по изоляции поверхности жидкого металла и ассимиляции всплывающих неметаллических включений. В процессе разливки стали химический состав шлака существенно меняется, что оказывает влияние на его свойства и выполнение им его функций.

Для более детального изучения шлакообразования в промежуточном ковше было проведено исследование изменения химического состава шлака при разливке трех серий опытных плавов на четырехручьева слябовой МНЛЗ. Серии опытов различались материалом футеровки промежуточного ковша и марками разливаемой

стали. Основные данные, характеризующие проведенный эксперимент, представлены в табл. 1.

Промежуточный ковш разделен перегородками из огнеупорного бетона на основе глинозема на три камеры – одну приемную и две распределительные. В исследовании изучали процесс шлакообразования в одной из распределительных камер.

Для наведения шлака использовали гранулированную шлакообразующую смесь, содержащую в среднем: 38,9 % CaO, 30,2 % SiO₂, 8,7 % Al₂O₃, 4,7 % MgO, 2,7 % F и около 4 % C. В небольшом количестве в смеси присутствовали оксиды натрия, калия и железа.

Первую порцию смеси (20 – 25 % от общего расхода) вводили при наполнении промежуточного ковша

Таблица 1

Основные параметры проведения опытов

Номер серии	Материал футеровки*	Марка стали	Число ковшей стали в серии	Масса стали, т	Длительность разливки, ч	Расход ШОС, кг/т стали
1	ШК	08Ю	9	3291	7,7	0,20
2	ШК	17Г1С-У	5	1875	6,8	0,22
3	ТМ	08Ю	10	3722	8,6	0,25

* ШК – шамотный кирпич, ТМ – торкрет-масса на основе оксида магния.

металлом. В дальнейшем смесь добавляли примерно одинаковыми порциями в начале разливки каждой плавки. В середине разливки первой, средней и последней плавки каждой серии отбирали пробы шлака для химического анализа. Изменение содержания в шлаке важнейших компонентов показано на рис. 1. Содержание фтора и оксидов натрия и калия в процессе разливки уменьшалось, а содержание оксида железа мало менялось, оставаясь примерно таким же, как в исходной шлакообразующей смеси.

В расположении на рис. 1 линий, показывающих изменение в процессе разливки содержания каждого из оксидов, наблюдается общая особенность. Две линии, показывающие изменение содержания любого компонента, располагаются рядом, а третья заметно отклоняется от них. Это свидетельствует о существенном влиянии на процесс шлакообразования обоих варьируемых в эксперименте факторов – материала футеровки промежуточного ковша и химического состава разливаемого металла.

По данным, представленным на рис. 1, процесс шлакообразования в промежуточном ковше можно представить следующим образом. В начале разливки, после расплавления первой порции шлакообразующей смеси, образуется первичный шлак, химический состав которого соответствует составу шлакообразующей смеси. В дальнейшем состав шлака непрерывно меняется в результате протекания двух процессов:

- растворения огнеупоров, контактирующих со шлаком (футеровка, разделительные перегородки, стопора);
- ассимиляции неметаллических включений, всплывающих из стали.

Содержание оксида кальция, основным источником поступления которого в шлак является шлакообразующая смесь, в процессе разливки всех трех серий опытных плавок уменьшалось. Причиной этого, несомненно, является увеличение массы шлака за счет растворения в нем огнеупоров и ассимиляции всплывающих неметаллических включений. Более высокая скорость уменьшения концентрации CaO при разливке второй

серии опытных плавок дает основание полагать, что из низколегированной стали 17Г1С-У в шлак поступает значительно больше неметаллических включений, чем из стали низкоуглеродистой. Это подтверждается значительно более высоким содержанием оксида марганца в шлаке второй серии опытов.

Изменение содержания оксидов кремния и магния связано с материалом футеровки ковша. Содержание оксида магния увеличивается при растворении в шлаке футеровки из магнезиальной торкрет-массы и уменьшается при растворении шамотной футеровки, которая этот оксид практически не содержит, но вносит в шлак значительное количество оксида кремния.

Для углубленного изучения процесса шлакообразования с выявлением количественных зависимостей была разработана специальная методика анализа полученных экспериментальных данных, которую можно назвать синтезом результатов экспериментов и математической модели шлакообразования. Ее основная идея состоит в том, что если известны с одной стороны масса шлакообразующей смеси, ее химический состав и химический состав всех огнеупоров, соприкасающихся со шлаком, а с другой стороны химический состав образовавшегося шлака, то можно рассчитать количество огнеупорных материалов, растворившихся в шлаке, а также количество и химический состав всплывших неметаллических включений. От регрессионного анализа, который обычно применяется для выявления количественных зависимостей по экспериментальным данным, эта методика отличается в основном тем, что в ней используется не формальная, а содержательная математическая модель, отражающая весь комплекс знаний об изучаемом процессе.

Основной математической модели процесса шлакообразования были балансовые уравнения, составленные на моменты отбора проб шлака. Общее балансовое уравнение шлакообразования в промежуточном ковше имеет вид

$$M_{\text{шос}} + M_{\text{ф}} + M_{\text{п}} + M_{\text{с}} + M_{\text{нв}} = M_{\text{шк}} + M_{\text{шф}} + M_{\text{г}}, \quad (1)$$

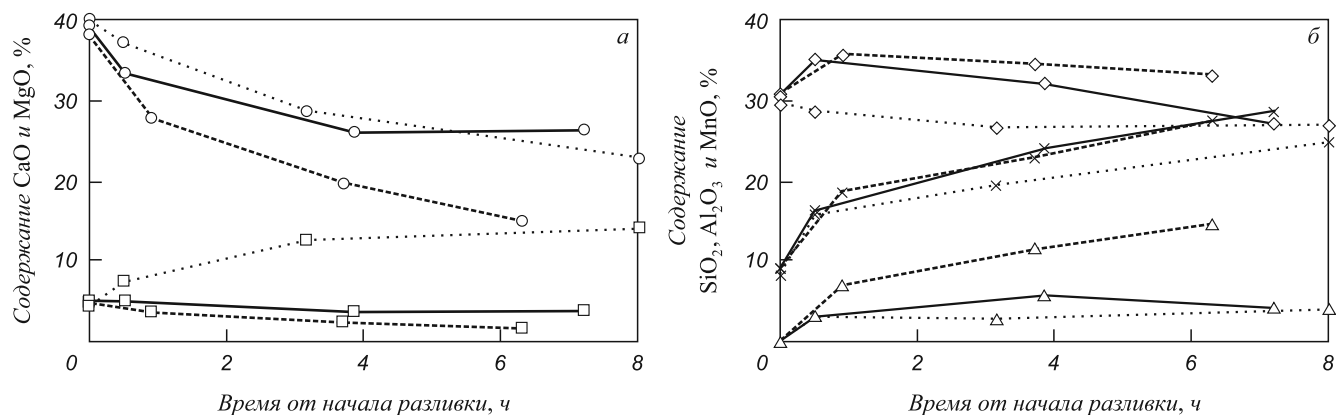


Рис. 1. Содержание оксидов кальция (○), магния (□), кремния (◇), алюминия (×) и марганца (Δ) в шлакообразующей смеси (начало разливки) и шлаке первой (—), второй (---) и третьей (.....) серии опытных плавок

где $M_{\text{шос}}$ – масса шлакообразующей смеси; $M_{\text{ф}}$, $M_{\text{п}}$, $M_{\text{с}}$ – масса футеровки, разделительных перегородок и стопоров, растворившихся в шлаке; $M_{\text{нв}}$ – масса неметаллических включений, всплывших в шлак; $M_{\text{шк}}$ и $M_{\text{шф}}$ – масса шлака в промежуточном ковше и шлака, впитавшего в футеровку; $M_{\text{г}}$ – масса компонентов шлакообразующей смеси (влаги и углерода), перешедших в газовую фазу.

Для любого компонента шлака в общем случае справедливо следующее балансовое уравнение:

$$K_{\text{шос}}M_{\text{шос}} + K_{\text{ф}}M_{\text{ф}} + K_{\text{п}}M_{\text{п}} + K_{\text{с}}M_{\text{с}} + K_{\text{нв}}M_{\text{нв}} = K_{\text{шк}}(M_{\text{шк}} + M_{\text{шф}}), \quad (2)$$

где K – содержание компонента в материале, соответствующем его индексу.

В пробах шлака, отобранных из промежуточного ковша, определялось содержание девяти компонентов. Поэтому в математическую модель образования шлака на момент отбора каждой пробы входило уравнение (1) и девять уравнений вида (2). Всплывающие неметаллические включения состоят из продуктов раскисления и легирования металла – оксидов алюминия, кремния, марганца и железа. Поэтому система из десяти балансовых уравнений шлака и его компонентов дополняется балансовым уравнением химического состава неметаллических включений

$$(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{нв}} + (\text{SiO}_2)_{\text{нв}} + (\text{MnO})_{\text{нв}} + (\text{FeO})_{\text{нв}} = 100 \%. \quad (3)$$

После этого количество уравнений становится больше количества входящих в них неизвестных величин. Такую систему уравнений можно решить методами, используемыми в математической статистике при нахождении уравнений регрессии.

Результаты решения такой системы уравнений будут смешаны с погрешностью определения содержания компонентов при химическом анализе материалов, участвующих в процессе шлакообразования. Для повышения точности определения неизвестных величин и выявления общих особенностей шлакообразования, система балансовых уравнений, составленных на момент отбора каждой пробы шлака во всех трех сериях опытов, решалась в форме единого многозадачного вычислительного комплекса. Более детально такая методика, успешно использовавшаяся при анализе экспериментальных данных, описана в работе [1].

При составлении единого вычислительного комплекса дополнительно к балансовым уравнениям были использованы математические зависимости, отражающие следующие предположения:

– масса растворившихся в шлаке огнеупорных материалов (футеровки, разделительных перегородок, стопоров) пропорциональна времени от начала разливки;

– масса всплывших в шлак неметаллических включений пропорциональна массе разлитой стали;

– химический состав всплывающих неметаллических включений в процессе разливки стали одной марки не меняется.

Решение системы балансовых уравнений производилось в среде электронных таблиц Excel с использованием надстройки «Поиск решения». В качестве критерия было принято условие минимизации суммы квадратов относительных расхождений результатов расчета содержания компонентов в шлаке с данными химического анализа.

Проверка на адекватность модели шлакообразования проводилась сопоставлением результатов расчета химического состава шлака с результатами анализа. Установлено, что связь между расчетными и опытными данными описывается уравнением парной линейной регрессии

$$[K]_{\text{расч}} = 0,983[K]_{\text{оп}} - 0,022 \quad (4)$$

с коэффициентом корреляции $r = 0,99$. Близость первого коэффициента в правой части уравнения (4) к единице, а второго к нулю дает основание принять гипотезу о равенстве результатов расчета опытными данным, т.е. признать, что разработанная модель шлакообразования адекватно описывает реальный процесс.

Результаты расчета изменения количества и толщины слоя шлака представлены на рис. 2. При расчете толщины слоя шлака плотность его по результатам проведенного ранее экспериментального исследования [2] была принята равной $3,4 \text{ г/см}^3$.

Как видно из рис. 2, масса шлака в промежуточном ковше в процессе разливки серии плавок многократно возрастает, причем заметно быстрее при использовании промежуточного ковша, имеющего футеровку из магнезиальной торкрет-массы. Средняя скорость растворения футеровки из шамотного кирпича составляет $0,68 \text{ кг/ч}$ на 1 м длины шлакового пояса, а футеровки из магнезиальной торкрет-массы в три раза больше –

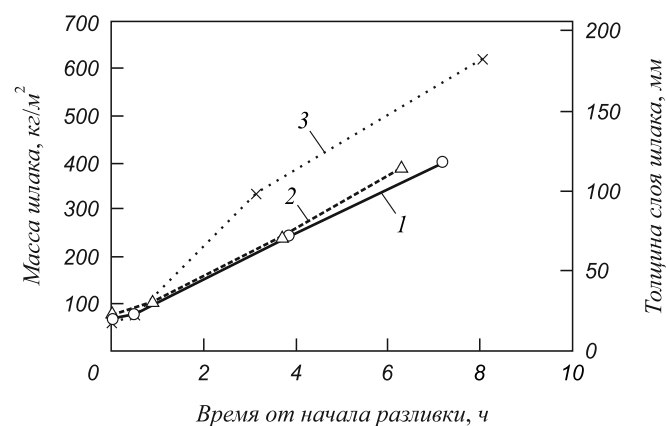


Рис. 2. Изменение массы и толщины слоя шлака в промежуточном ковше в первой (1), второй (2) и третьей (3) серии опытных плавок

2,06 кг/ч на 1 м. Скорость перехода в шлак материала разделительных перегородок и стопоров во всех опытах отличалась незначительно и составляла в среднем 0,3 кг/ч на 1 м длины шлакового пояса.

Расчеты показали, что в начале разливки каждой серии опытных плавов происходит проникновение шлака в поры футеровки. Масса шлака, поступившего в шамотную футеровку, невелика – около 1 % от его количества. В пористую футеровку из магнезиальной торкрет-массы поступает значительно больше шлака – около 30 %. Шлак, проникающий в поры этой футеровки, вступает в реакцию с ее магнезиальной основой с образованием новой фазы – энстатита. Чистый энстатит $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ плавится инконгруэнтно при температуре 1557 °С. Присутствие примесей понижает температуру его плавления. Рабочая поверхность футеровки имеет температуру разливаемого металла 1540 – 1560 °С. Поэтому материал рабочего слоя футеровки по шлаковому поясу плавится и переходит в шлак. Этим объясняется более интенсивное растворение в шлаке тугоплавкой магнезиальной футеровки.

Интенсивное растворение футеровки из магнезиальной торкрет-массы подтверждается также результатами определения участия шлакообразующей смеси, огнеупорных материалов и неметаллических включений в формировании конечного шлака (рис. 3).

Как видно из рис. 3, главную роль в изменении количества и химического состава шлака играет не растворение в нем огнеупорных материалов, а ассимиляция всплывающих неметаллических включений. Особенно много неметаллических включений всплывает в шлак при разливке низколегированной стали (табл. 2).

Приведенные в табл. 2 данные о содержании оксида железа в неметаллических включениях вероятно являются несколько заниженными. Основанием для такого предположения является практически постоянное содержание этого оксида в пробах шлака, отобранных при проведении всех трех серий опытов. Можно предположить, что содержание оксида железа в шлаке определяется не поступлением его из шлакообразующих материалов, а химическими процессами восстановительного характера, протекающими в шлаковом расплаве. Многочисленные сферические включения металла были обнаружены при изучении микроструктуры затвердевших шлаков промежуточного ковша [3]. Малые размеры включений металла (менее 5 мкм) указывают

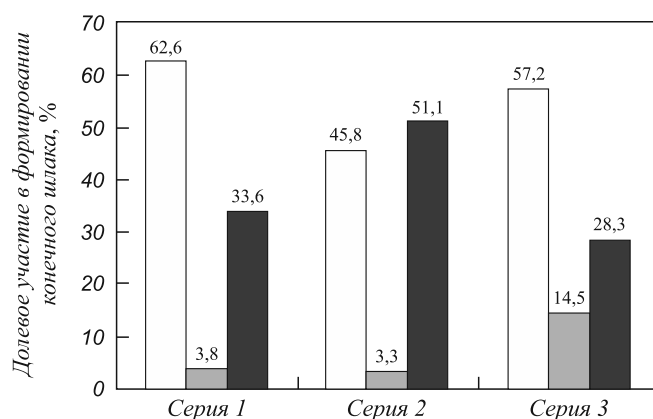


Рис. 3. Участие шлакообразующей смеси (□), огнеупорных материалов промежуточного ковша (▤) и неметаллических включений (■) в формировании конечного шлака

на их эндогенное происхождение. Восстановителем оксида железа, по-видимому, является углерод, входящий в состав шлакообразующей смеси. Следовательно присутствие углерода в шлакообразующих смесях обеспечивает низкий окислительный потенциал шлакового расплава и его химическую нейтральность по отношению к разливаемому металлу.

Балансовые уравнения, составленные для фтора, не выявили уменьшения его массы в шлаке по сравнению с тем количеством, которое было внесено шлакообразующей смесью. Вероятно при небольшом (2 – 3 %) содержании фтора в смеси не происходит заметного перехода его в атмосферу.

Пробы шлака из промежуточного ковша были использованы также для определения температуры его плавления. Температура плавления конечного шлака в трех сериях опытов составляла 1317, 1341 и 1378 °С соответственно, что существенно больше температуры плавления использованной шлакообразующей смеси (1240 °С). Некоторые отклонения от стандартных условий, неизбежные на производстве, например увеличение количества ковшей металла в серии или повышенное содержание в стали неметаллических включений могут привести к затвердеванию поверхности шлака и преждевременной замене промежуточного ковша.

Выводы. В процессе разливки происходит существенное увеличение массы и изменение химического состава шлака в промежуточном ковше МНЛЗ. Ключевую

Таблица 2

Масса и химический состав неметаллических включений

Марка стали	Масса всплывших неметаллических включений, % от массы разлитой стали	Содержание, %			
		Al_2O_3	SiO_2	MnO	FeO
08Ю	0,0095	68,2	4,1	18,9	8,8
17Г1С-У	0,0298	38,5	34,7	26,7	0,1

роль в этом процессе играет поступление в шлак неметаллических включений, всплывающих из разливаемой стали. При разливке низкоуглеродистой стали масса всплывших неметаллических включений составляет около 30 % от массы конечного шлака, а при разливке низколегированной стали – около 50 %.

Значительно меньшую роль в изменении химического состава шлака играет растворение огнеупорной футеровки промежуточного ковша. При шамотной футеровке масса растворившихся в шлаке огнеупоров составляет около 5 %, а при магнезиальной футеровке – около 15 % от массы конечного шлака.

УДК 621.774.35:621.789

Г.М. Дружинин¹, Ю.А. Самойлович¹, Е.В. Попов²

¹ Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники

² Уральский федеральный университет

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УГАРА МЕТАЛЛА В НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ В СЛУЧАЕ НЕЗАПЛАНИРОВАННЫХ ДЛИТЕЛЬНЫХ ПРОСТОЕВ

Аннотация. Представлены результаты расчетных исследований с использованием математической модели, позволяющей определить рациональный тепловой режим работы нагревательной печи при длительном незапланированном простое с точки зрения минимизации окисления.

Ключевые слова: нагревательная печь, кинетика окисления, математическая модель, простой, оптимальный тепловой режим.

METALL LOSSES IN HEATING FURNACES ON THE OCCASION OF UNBIDDEN LONG DEMURRAGE COMPUTATION STUDY

Abstract. Results of settlement researches are presented in this article with use of the mathematical model, allowing to define a rational thermal operating mode of the heating furnace at long unplanned idle time from the point of view of Oxidation kinetics minimization.

Keywords: heating furnace, oxidation kinetics, mathematical model, blowing-down, optimum thermal mode.

Остановки работы прокатного стана оказывают непосредственное влияние на работу нагревательных печей, а именно вызывают их простои. При длительных простоях (20 мин и более) отсутствие перемещения заготовок в печи при неизменном температурном режиме приводит к перегреву металла и повышенному окислению.

Следует отметить, что в общем случае незапланированные простои печи сопровождаются избыточным расходом топлива, однако в данной работе критерием негативных последствий длительного простоя принята скорость окисления на поверхности нагреваемых заготовок.

Расчетные исследования особенностей теплового режима нагрева металла с учетом окисления проведены с использованием математической модели [1, 2] для следующих условий:

– настройка математической модели для базового режима (без простоев) осуществляется для условий нагрева стальных заготовок квадратного сечения (100×100 мм) в

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Селиванов В.Н., Колесников Ю.А., Буданов Б.А. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2004. № 7. С. 19 – 22.
2. Дюльдина Э.В., Селиванов В.Н., Лозовский Е.П. // Расплавы. 2009. № 6. С. 3 – 10.
3. Дюльдина Э.В., Селиванов В.Н., Рыбалко О.Ф.: Тр. XIII Российской конф. «Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов». Т. 3. – Екатеринбург: УрО РАН, 2011. С. 119 – 122.

© 2013 г. В.Н. Селиванов, Э.В. Дюльдина,

Е.П. Лозовский, А.В. Коротин

Поступила 21 января 2013 г.

печи двухстадийного нагрева с использованием результатов термометрирования заготовок [3];

– исследование окисления на поверхности нагреваемых заготовок выполнено в условиях повышенной температуры при простое печи длительностью 40 мин;

– в качестве способа снижения степени окисления используется поддувание поверхности заготовок в период длительного простоя.

Объектом исследования выбрана заготовка под прокатку из кипящей стали СтЗкп сечением 100×100 мм и длиной 2,5 – 3,3 м, обрабатываемая в прямоточно-противоточной методической печи стана 250 Нижне-Сергинского металлургического завода (НСМЗ) с центральным отбором продуктов сжигания топлива [3]. Печь состоит из двух зон, разделенных дымоотводом, что позволяет осуществить двухстадийный малоокислительный нагрев заготовок при возможности эффективного регулирования тепловых режимов каждой зоны.