

*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 плавок низкоуглеродистой и низколегированной стали массой 360 т. Установлено, что при разливке серии из 5 – 10 плавок 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 магнезиальной 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 magnesia 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 плавок 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 % SiO<sub>2</sub>, 8,7 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4,7 % MgO, 2,7 % F и около 4 % С. 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.

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

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

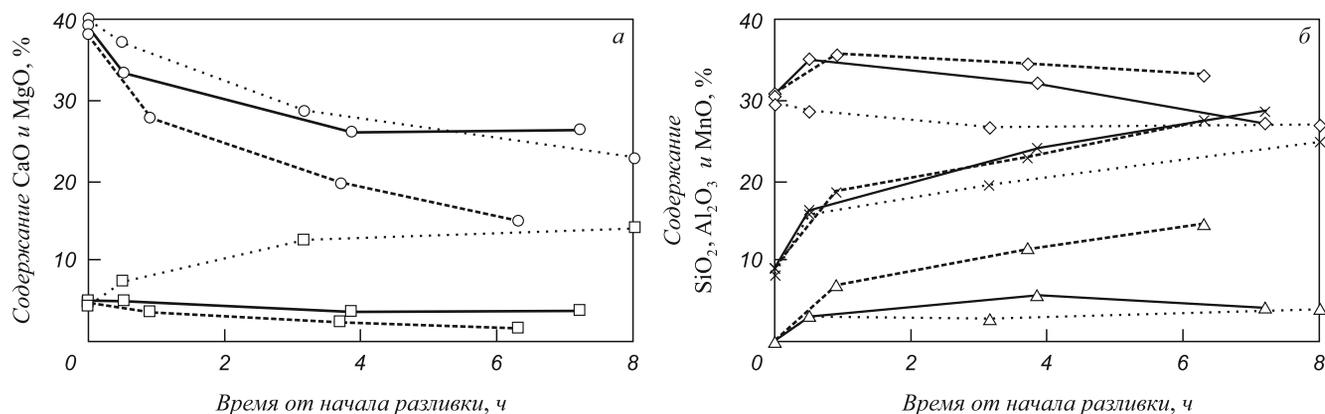


Рис. 1. Содержание оксидов кальция (○), магния (□), кремния (◇), алюминия (×) и марганца (Δ) в шлакообразующей смеси (начало разливки) и шлаке первой (—), второй (---) и третьей (.....) серии опытных плавок

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

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

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

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

$$(Al_2O_3)_{нв} + (SiO_2)_{нв} + (MnO)_{нв} + (FeO)_{нв} = 100 \%. \quad (3)$$

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

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

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  $1 \text{ м}$  длины шлакового пояса, а футеровки из магнезиальной торкрет-массы в три раза больше –

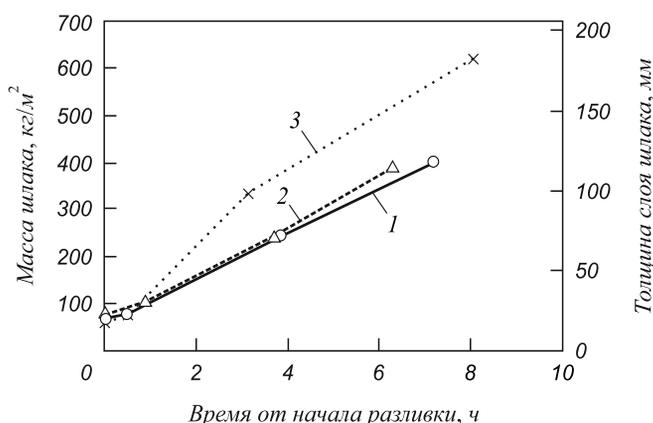


Рис. 2. Изменение массы и толщины слоя шлака в промежуточном ковше в первой (1), второй (2) и третьей (3) серии опытных плавок

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  $MgO \cdot SiO_2$  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

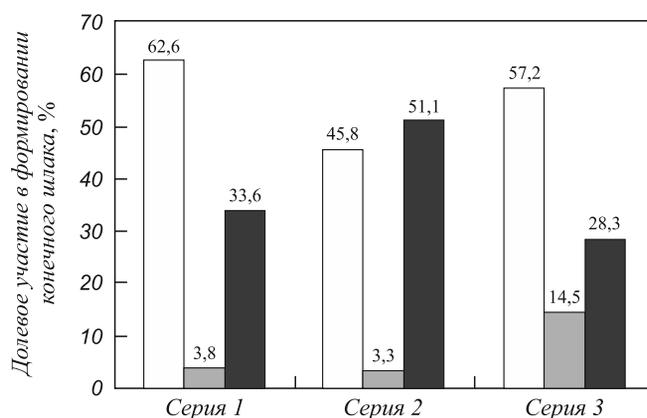


Рис. 3. Участие шлакообразующей смеси (□), огнеупорных материалов промежуточного ковша (▤) и неметаллических включений (■) в формировании конечного шлака

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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	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 низколегируемой 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.

## 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.

УДК 621.774.35:621.789

**Г.М. Дружинин<sup>1</sup>, Ю.А. Самойлович<sup>1</sup>, Е.В. Попов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники  
<sup>2</sup> 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

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 подстуживание 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.