

В. О. Синельников¹ (✉), д. т. н Д. Калиш¹, к. т. н. Р. Д. Куземко²

¹ «AGH» Научно-технический университет, Краков, Польша

² ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Украина

УДК 669.76:669.184.001

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНВЕРТЕРНОГО ШЛАКА ПРИ ЕГО РАЗБРЫЗГИВАНИИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ФУТЕРОВКИ

Рассмотрены методы совершенствования процесса разбрызгивания шлака. Проведены исследования фазово-минералогических свойств конвертерного шлака одного из металлургических комбинатов Европы. Приведены результаты моделирования различных по составу шлаков с использованием ранее проведенных исследований физико-химических свойств.

Ключевые слова: разбрызгивание шлака, технология «slag splashing», конвертерный шлак.

В технологии производства кислородно-конвертерной стали на себестоимость сильно влияет стойкость огнеупорной футеровки. Оценочная стоимость перефутеровки 350-т конвертера составляет 1 млн долл. США, что заставляет производителей внимательно подходить к вопросам замены футеровки, искать конструктивные решения, а также принимать меры по совершенствованию уже существующих технологий.

Одним из отходов сталеплавильного производства является конвертерный шлак, который может быть повторно использован в процессах рециклинга (переработки), а также при производстве материалов, предназначенных для строительства. Одним из альтернативных методов утилизации конвертерного шлака является процесс разбрызгивания шлака, в котором ранее выбрасываемый на шлаковые горы материал, разбрызгивается на рабочую поверхность футеровки кислородного конвертера [1, 2]. Причинами износа футеровки являются химическая эрозия огнеупорной футеровки от взаимодействия с жидким металлом либо шлаком, воздействие высоких температур в полости конвертера (термический шок), а также механические разрушения в результате загрузки шихты в кислородный конвертер. Технология «slag splashing» является наиболее эффективным приемом из всех применяемых для защиты футеровки. Первыми эту перспективную технологию применили на комбинате

Indiana Harbour Works of LTV Steel (США) в 1992 г. [3]. Спустя три года технология была успешно внедрена в кислородном конвертере № 4 предприятия Boland (Китай) и в данный момент применяется в 95 % металлургических производств этого государства. В последнее время технология «slag splashing» стала все чаще применяться на комбинатах Европы и СНГ (например, в Украине на комбинатах ЧАО «МК «Азовсталь» и ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог», в России на комбинатах ПАО «Северсталь», ОАО «Западно-Сибирский металлургический комбинат», а также в Польше на предприятии ArcelorMittal w Dąbrowie Górniczej). Эффективность технологии зависит в основном от двух факторов: параметров и метода разбрызгивания жидкого шлака, а также от его физико-химических свойств. В литературе достаточно широко описаны способы разбрызгивания шлака и энергетические параметры этого процесса [1, 2, 4–7]. Авторами [8–12] предложен ряд усовершенствований, а именно конструкция газоохлаждаемой фурмы, количество сверхзвуковых сопел, а также их угол наклона и расположение. Из представленных результатов моделирования следует, что на эффективность процесса разбрызгивания ключевое влияние оказывают физико-химические свойства конвертерного шлака (плотность, динамическая вязкость, поверхностное натяжение, основность, температуры затвердевания и плавления), которые зависят от его химического состава [8–12].



В. О. Синельников
E-mail: victoriano090691@gmail.com

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ КОНВЕРТЕРНЫХ ШЛАКОВ

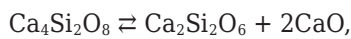
Конвертерный процесс протекает в условиях высокой окисляемости, из-за этого конвертерные

шлаки содержат значительную часть железа, а главными составляющими являются FeO, CaO и SiO₂ (при этом часть оксидов железа присутствуют в виде Fe₂O₃). Стоит отметить, что увеличение количества SiO₂ приводит к тому, что вюстит (FeO) в равновесии с Fe содержит около 10 % Fe₂O₃. Увеличение доли кремния в шлаке снижает содержание Fe₂O₃, в свою очередь, при добавлении CaO в вюстит в равновесии с Fe доля Fe₂O₃ может достигать и 20 % [13]. Изменение активности FeO в жидком растворе FeO–CaO–SiO₂ показано на рис. 1.

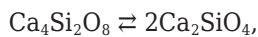
Для расчета состава шлака рассматривают все возможные частицы, которые могут существовать в системе. Например, в шлаке, состоящем из FeO, CaO и SiO₂, возможно образование восьми молекул: Ca₂SiO₄, CaSiO₃, FeSiO₃, Fe₂SiO₄, Ca₂Si₂O₆, Ca₄Si₂O₈, CaO и FeO. Для расчета молярных долей необходимо восемь уравнений, три из которых следуют из баланса массы, каждое для одного оксида. Например, для CaO имеем следующую зависимость:

$$n_{\text{CaO}} + n_{\text{CaSiO}_3} + 2n_{\text{Ca}_2\text{SiO}_4} + 2n_{\text{Ca}_2\text{Si}_2\text{O}_6} + 4n_{\text{Ca}_4\text{Si}_2\text{O}_8} = n_{\text{CaO}}^*$$

Суммарное количество оксидов n_{CaO}^* , n_{FeO}^* и $n_{\text{SiO}_2}^*$ возникает из химического анализа. Остальные пять условий можно вывести из констант равновесия реакций такого типа:



$$K_1 = \frac{(N_{\text{CaO}})^2 \cdot N_{\text{Ca}_2\text{Si}_2\text{O}_6}}{N_{\text{Ca}_4\text{Si}_2\text{O}_8}},$$



$$K_2 = \frac{(N_{\text{Ca}_2\text{SiO}_4})^2}{N_{\text{Ca}_4\text{Si}_2\text{O}_8}},$$

где K_1 и K_2 — константы равновесия; N — число молей.

Минералогическая структура шлаков в твердом состоянии достаточно хорошо изучена,

однако это не дает точных данных о структуре этих шлаков в жидком состоянии. Содержание в шлаках с высокой основностью большого количества элементов не позволяет точно определить границы их напряжений, отвечающих постоянному минералогическому составу шлака. При исследовании основных шлаков в твердом состоянии установили наличие следующих групп соединений [14]:

- силикаты: CaO·MgO·SiO₂ — монтичеллит, 2CaO·SiO₂ — белит (силикат кальция);
- шпинели: MgO·Fe₂O₃ — магнетитоферрит, 2CaO·Fe₂O₃ — феррит кальция, MgO·Al₂O₃;
- свободные оксиды: CaO, FeO, MnO;
- фосфаты: 3CaO·P₂O₅, 4CaO·P₂O₅ и 3FeO·P₂O₅;
- сульфиды: CaS, MnS.

При исследовании структуры и физико-химических свойств жидких шлаков установили, что они представляют собой ионные жидкости, главным структурным элементом которых является тетраэдр, построенный из четырех крупных, плотно расположенных ионов кислорода, содержащих в середине маленький ион кремния (рис. 2).

В кварце и кремнеземе в жидком состоянии основные тетраэдры соединены углами. Несмотря на высокую степень полимеризации, которая сохраняется в жидком состоянии, после плавления некоторые из углов тетраэдров становятся свободными.

Для оптимизации и повышения эффективности технологии «slag splashing» следует скорректировать химический и минералогический составы конечного шлака, а именно содержание оксида железа и оксида магния. В результате увеличения основности путем добавления MgO можно предположить, что атомы кислорода, полученные из оксидов, присоединяются к тетраэдрам силикатов, что приводит к разрыву кислородных мостиков между ними. Эти процессы соответствуют реакции:

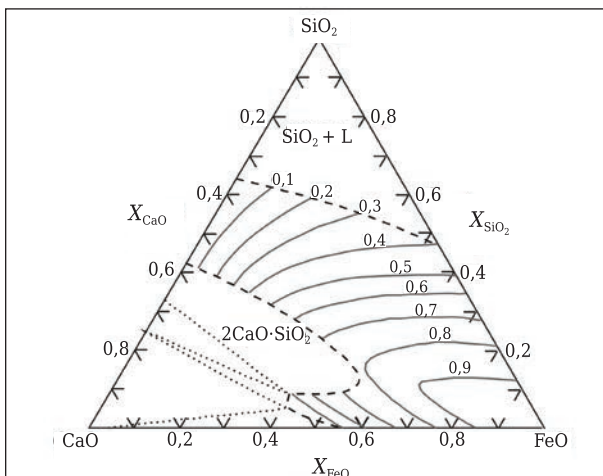


Рис. 1. Активность FeO в жидком растворе FeO–CaO–SiO₂ при 1550 °C в равновесии с жидким Fe

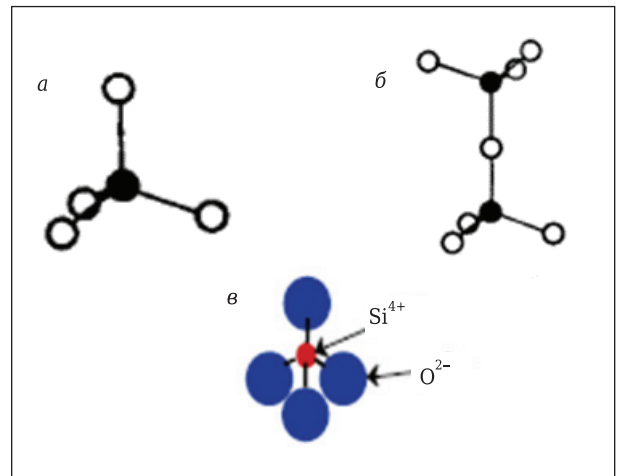
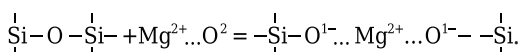


Рис. 2. Структура кремнезема: а — тетраэдр одиночный; б — двойной тетраэдр; в — тетраэдр Si–O



Атомы кислорода имеют в месте разрыва кислородного мостика отрицательный заряд, в результате чего положительно заряженные ионы металлов размещаются в их окрестностях в пустых пространствах сети. Следовательно, структура кристаллических силикатов (а также стекланных и жидких) имеет ионный характер, причем катионами являются ионы металлов, анионами — полимеризованные силикатные ионы.

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА СВОЙСТВА КОНВЕРТЕРНОГО ШЛАКА В ТЕХНОЛОГИИ «SLAG SPLASHING»

Создание высоко- и низкотемпературных фаз в конвертерном шлаке

С целью увеличения эффективности технологии «slag splashing» к конвертерному шлаку должны предъявляться достаточно высокие требования. В шлаке должны присутствовать фазы, характеризующиеся как высокой, так и низкой температурой плавления [15, 16].

Фазы с низкой температурой плавления позволяют шлаку прилипать к футеровке, легко проникать в трещины и поры и стекать по стенкам во время самого разбрызгивания. Они содержат большое количество FeO и S, их главной задачей является непосредственное соединение с огнеупорным материалом. Шлак, содержащий значительное количество FeO, меньше подвержен воздействию углерода и реагирует с MgO, образуя фазу $\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ и шпинели из MgO и Fe, которые действуют как связующие элементы. Низкотемпературными фазами являются $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (CF, $T_{\text{пл}} = 1216^\circ\text{C}$), $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_2F , $T_{\text{пл}} = 1440^\circ\text{C}$) [3]. Фазовая диаграмма системы $\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{CaO}$ показана на рис. 3 [17, 18]. В случае конвертерного

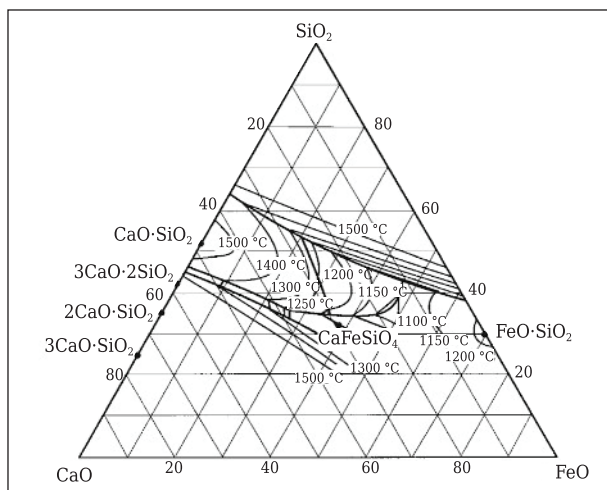


Рис. 3. Диаграмма фазового состояния системы $\text{SiO}_2-\text{FeO}-\text{CaO}$ в равновесии с жидким железом (программа FactSage 6.2). Фазы: волластонит [$\text{Ca}_3(\text{Si}_3\text{O}_9)$], псевдоволластонит [CaSiO_3], кремнезем [SiO_2]; температуры ликвидус для большинства выбранных фаз ниже 1473 K [17, 18]

го шлака железо присутствует не только в виде FeO — в результате контакта шлака с воздухом образуется Fe_2O_3 , который является неустойчивым при контакте с жидким железом [19, 20]. Доля $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ в шлаке уменьшается вместе с уменьшением основности, следствием чего является возрастание содержания кремнезема (SiO_2), а также уменьшение FeO. В работе [19] проведен расчет доли $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ в шлаке при помощи программы FactSage, а результаты сопоставлены с экспериментальными данными других авторов. В шлаке с содержанием FeO 10–20 % доля $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ составляет от 0,12 до 0,18. Так как Fe_2O_3 считается кислой фазой в высокоосновном шлаке, то растворение в таком шлаке MgO является возможным. В работе [19] исследована возможность растворения MgO путем замены FeO на Fe_2O_3 в программе FactSage. Результаты расчетов показали небольшое возрастание растворимости MgO (<1 %) [20].

Задачей фаз с высокой температурой плавления является обеспечение теплоизоляции и защита материала футеровки, покрытой фазами с низкой температурой плавления. Следовательно, для эффективности проведения процесса необходимо присутствие в шлаке обеих групп фаз. Фазы с низкой температурой плавления содержат 10–15 % FeO в форме связи $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ при увеличенном содержании MgO и CaO/SiO_2 , равном 2,5. Кроме того, фазами с высокой температурой плавления являются связи $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S) — алит, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S) — белит, $\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (MF). Это означает, что добавка MgO (>8 %) позволяет путем насыщения изменять химический состав и ограничивать образование соединений кальция ($\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), одновременно способствуя образованию фаз с высокой температурой плавления $\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ($T_{\text{пл}} = 2223\text{ K}$) [3].

Обогащение конвертерного шлака оксидом магния

В конвертерном процессе [21] содержание MgO в шлаке находится на уровне 6 %, а после обогащения шлака магниесодержащими веществами составляет 8–13 %, что способствует значительному продлению времени службы футеровки. Также отмечено положительное действие MgO при выплавке стали в электродуговой печи. В данном случае при добавлении MgO, помимо защитных свойств футеровки, наблюдалось повышение эффективности использования электроэнергии, а также возникновение эффекта вспенивания шлака, который защищает футеровку от прямого воздействия электрической дуги. В настоящее время применяют предварительно спеченные либо переплавленные магниесодержащие материалы, а также порошковые материалы, которые в промышленной практике вдуваются в шлак при помощи водоохлаждаемой либо газоохлаждаемой фурмы [7,

8, 10]. Переплавленные материалы — это предварительно помолотые или раздробленные до определенного размера отработанные огнеупорные материалы, а в некоторых случаях производственные отходы огнеупорных предприятий.

Обогащение конвертерного шлака дополнительными фракциями MgO является достаточно эффективным методом [2, 9, 12]. При этом также очень важно получение высокой концентрации фаз с высокой температурой плавления, а также увеличение вязкости шлака, например путем добавления доломита. В свою очередь, повышенное содержание FeO в шлаке приводит к снижению температуры плавления и вязкости, а также увеличивается доля фаз с низкой температурой плавления. Появляется необходимость добавления угля в шлак с целью понижения содержания FeO в результате реакции редукиции. Предположено, что оптимальное содержание FeO в шлаке должно составлять 13 % [1, 3, 9].

Основность шлака

Одним из следствий химического состава шлака является его основность, которую можно определить из следующих выражений:

$$X_{\text{CaO}} = \frac{n_{\text{CaO}}}{n_{\text{SiO}_2}}, \quad (1)$$

$$X_{\text{CaO+MgO}} = \frac{n_{\text{CaO}} + n_{\text{MgO}}}{n_{\text{SiO}_2}}, \quad (2)$$

$$X_{\text{CaO+MgO}}^* = \frac{n_{\text{CaO}} + n_{\text{MgO}}}{n_{\text{SiO}_2} + n_{\text{Al}_2\text{O}_3}}, \quad (3)$$

где n — содержание компонента, мас. %; $X_{\text{CaO+MgO}}$ и $X_{\text{CaO+MgO}}^*$ — основность шлака, рассчитанная с учетом основных оксидов CaO и MgO и с учетом основных оксидов CaO и MgO, а также амфотерного оксида Al_2O_3 соответственно.

Как показали расчеты, оксиды MgO и Al_2O_3 влияют на основность конвертерных шлаков. Химический состав конвертерного шлака, %: Al_2O_3 2,0, CaO 44,6, FeO 26,8, MgO 9,3, MnO 4,2, SiO_2 11,5, остальное — 1,6 [22]. На основании доли отдельных оксидов в химическом составе шлака, а также с использованием выражения (1)–(3) получена основность: $X_{\text{CaO}} = 3,88$, $X_{\text{CaO+MgO}} = 4,69$, $X_{\text{CaO+MgO}}^* = 3,99$.

Для исследуемого шлака основность составила от 3,88 до 4,69. В работе [23] основность составляла около 2–3, в работе [24] — от 2,35 до 3,25 в зависимости от исследуемого образца.

Влияние добавки MgO на основность конвертерного шлака

Добавка MgO, %	X_{CaO}	$X_{\text{CaO+MgO}}$	$X_{\text{CaO+MgO}}^*$
8	3,88	4,57	3,89
9	3,83	4,60	3,92
10	3,88	4,75	4,05
11	3,88	4,85	4,13
12	3,88	4,95	4,22
13	3,88	5,05	4,30

Определено влияние добавок MgO на основность, что позволило оценить целесообразность их применения для лучшего прилипания шлака к футеровке. Расчеты выполнены по уравнениям (1)–(3), при этом учитывали изменение содержания MgO от 8 до 13 % (см. таблицу).

Вязкость шлака

Исследования вязкости были проведены для фазовой системы SiO_2 –CaO–FeO в равновесии с Fe [17]. Влияние CaO и FeO на вязкость было определено при различных концентрациях SiO_2 . При низком содержании SiO_2 с увеличением доли CaO/FeO вязкость возрастает, при высоком — уменьшается, а затем возрастает по мере увеличения соотношения CaO/FeO. При концентрации SiO_2 до 33,2–33,6 моль при 1500 °C рост концентрации CaO от 7,2 до 25 моль приводит к увеличению вязкости с 0,029 до 0,034 Па·с, а при концентрации SiO_2 до 45,8 моль вязкость изменилась с 0,077 Па·с (при концентрации CaO 6,8 моль) до 0,132 Па·с (при концентрации CaO 31,2 моль). Вязкость стремительно возрастает при высоких концентрациях SiO_2 (33–44 моль), однако при возрастании доли CaO/FeO (при концентрации SiO_2 44,5 моль) вязкость сначала снижается, а затем возрастает. При этом стоит отметить, что вязкость является минимальной при концентрации CaO, равной 13 и 11 моль при 1350 °C. Приведенные в работе [17] линии изо-вязкости при 1673 К описывают влияние химического состава на вязкость (рис. 4).

В работах [2, 9] исследовано влияние содержания FeO на вязкость конвертерного шлака с использованием математических моделей Riboud, Urbain и программы FactSage. Содержание FeO составляло от 5 до 30 %. При содержании 5 % при 1500 °C вязкость составляла 0,6 Па·с, при 10 % — 0,29 Па·с, при 15 % — 0,14 Па·с, т. е. возрастание содержания FeO приводило к снижению вязкости (данные по модели Riboud).

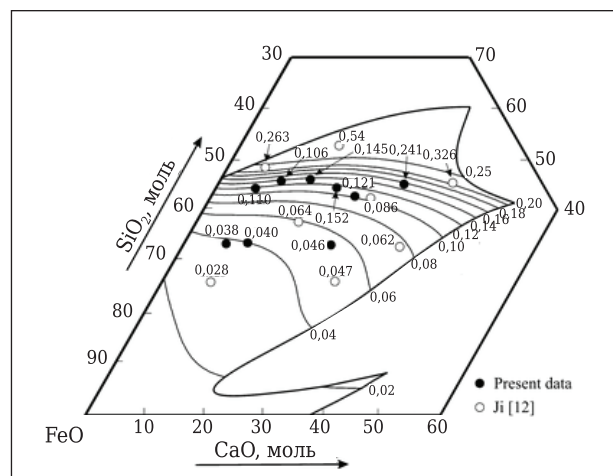


Рис. 4. Линии iso-вязкости в системе SiO_2 –FeO–CaO в равновесии с металлическим Fe при 1673 К [17]

Расчеты с вышеуказанными химическими составами шлака при температурах от 1500 до 1650 °C показали повышение текучести шлака в результате возрастания содержания в нем FeO. Аналогичное влияние на текучесть шлака оказывает повышение температуры. Снижение вязкости является результатом деполимеризации силикатных цепочек ввиду возрастания основности шлака. Возрастание вязкости может быть результатом выделения твердых соединений, таких как $3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ — мервинит, $2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$, $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ — белит.

Адгезия жидкого шлака с поверхностью огнеупорной футеровки конвертера

В настоящее время в производстве стали наиболее часто применяют магнийсодержащие огнеупоры с углем. Эти материалы должны характеризоваться наименьшей пористостью, причем поры должны быть заполнены углеродными соединениями с максимальным содержанием углерода 5 %, они заменяют формованные монолитные огнеупоры. Долговечность работы футеровки зависит от условий эксплуатации и технического обслуживания металлургического предприятия (рис. 5).

При уходе за футеровкой необходимо учитывать влияние механизма адгезии шлака с поверхностью футеровки конвертера. Наиболее важным аспектом при этом является критерий смачиваемости [1, 26–28]:

- если угол смачивания θ между шлаком и футеровкой принимает значения более 90°, то смачивание не происходит;

- при значениях угла θ менее 90° шлак смачивает поверхность твердого тела. При этом следует учитывать, что чем меньше значение этого угла, тем более полным будет смачивание.

Кроме условий смачиваемости футеровки следует рассмотреть условия смачиваемости мелкодисперсных твердых частиц MgO, содержащихся в шлаке. Если шлак смачивает керамический материал, то проникает в поры рабочего слоя футеровки. Существенную роль при

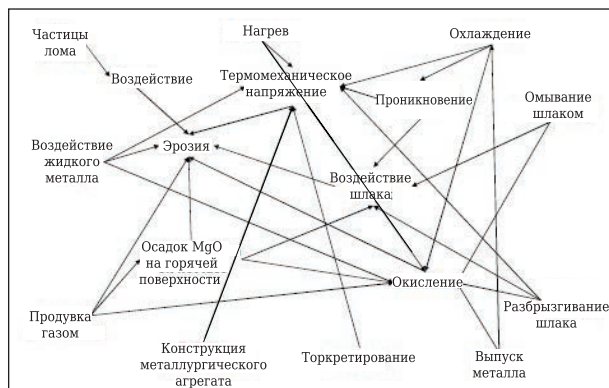


Рис. 5. Влияние некоторых параметров на огнеупорную футеровку кислородного конвертера [25]

этом играет шлак, который содержит фазы с низкой температурой плавления, т. е. шлак с низкой вязкостью, содержащий достаточное количество FeO. Такой шлак легко реагирует с углеродом, находящимся в порах, тем самым вызывая его окисление, что приводит к эффекту вспенивания шлака.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для анализа химического состава от исследуемого конвертерного шлака были отделены металлические капли и кусочки нерастворенной извести, которые затем помололи и просеяли. Образец шлака был исследован методом РФА на оборудовании Twin-X с использованием имеющихся шаблонов шлака. Содержание основных компонентов в образце конвертерного шлака, %: MgO 8,39, Al_2O_3 1,16, SiO_2 13,18, P 0,19, K_2O 0,02, CaO 48,01, TiO_2 0,18, Mn 1,64, Fe 12,12.

Для поиска областей с возможными различными химическими составами были проведены исследования на оптическом микроскопе. Затем для более точного анализа химического состава конвертерного шлака были выполнены исследования с использованием сканирующей микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа (EDS анализ) в областях выделенных фаз (рис. 6–8).

В исследованных образцах видны фазы, которые содержат кислород, кальций, кремний и железо. Из процентного содержания можно сделать вывод, что шлак содержит большое количе-

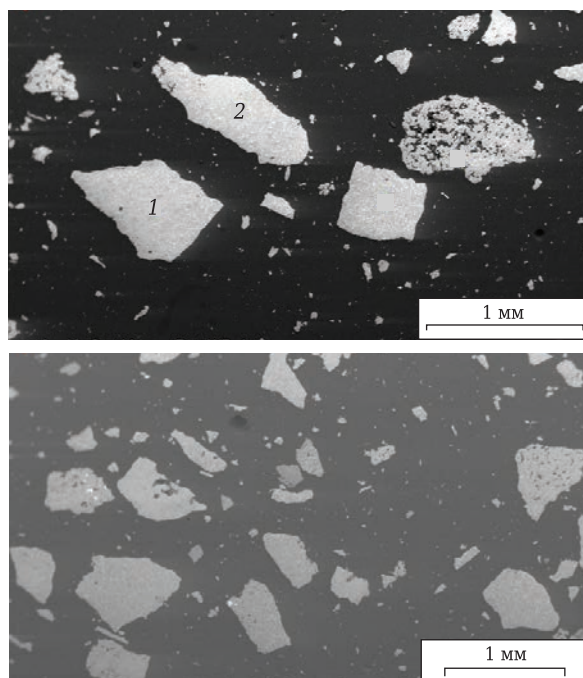


Рис. 6. SEM-изображение микроструктуры конвертерного шлака: 1, 2 — области с разным химическим составом

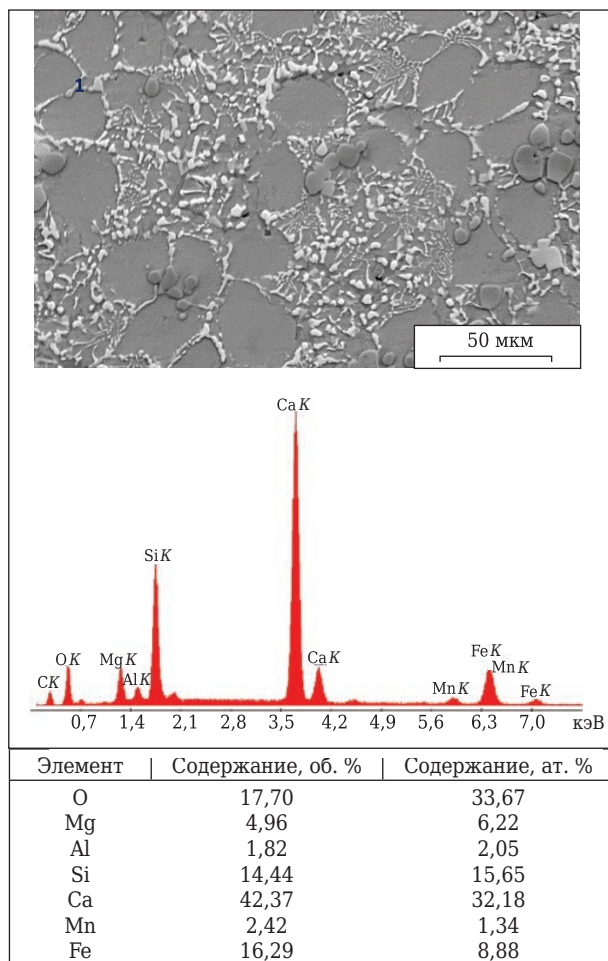


Рис. 7. Микроструктура и EDS-анализ шлака области № 1 (см. рис. 6)

ство фаз CaO и SiO_2 , при этом содержание CaO доминирует. Количество MgO , находящегося в шлаке, является типичным для этого типа материала и позволяет обеспечивать эффективную защиту футеровки в течение процесса производства стали. Однако с точки зрения технологии «slag splashing» содержание MgO требуется повысить до рекомендуемого уровня (8–14 %) путем насыщения первичного шлака в результате вдувания дополнительных порций оксида магния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализировано влияние химического состава конвертерного шлака на стойкость футеровки конвертера с точки зрения применения технологии разбрызгивания шлака.

Определено влияние отдельных фаз шлака (в особенности оксидов FeO и MgO) на эффективность технологии «slag splashing» с точки зрения создания фаз с низкими и высокими температурами плавления и на реологические свойства шлака при температурах от 1200 °C и выше. Установлено влияние оксидов железа на снижение вязкости шлака, от которой зависит легкость

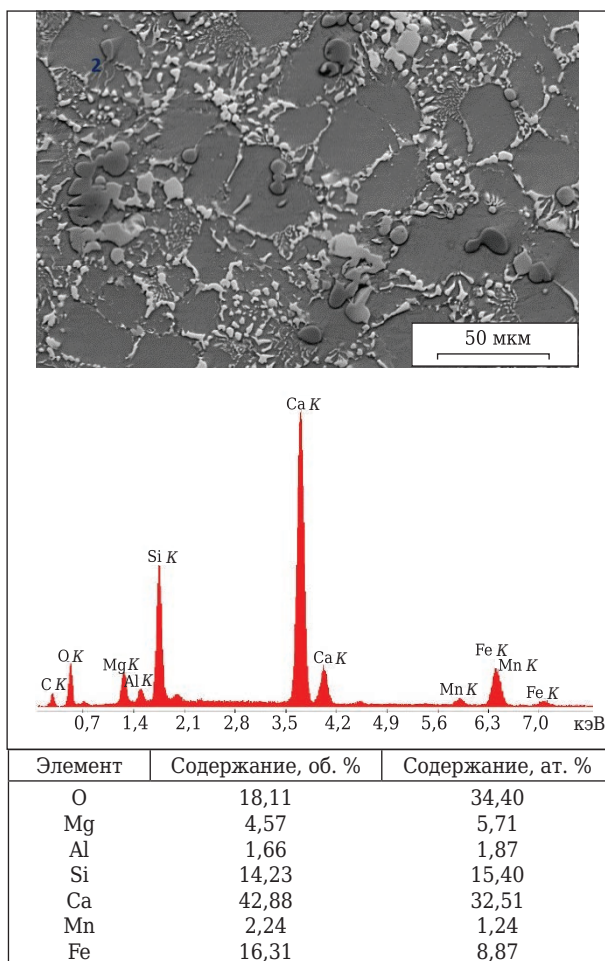


Рис. 8. Микроструктура и EDS-анализ шлака области № 2 (см. рис. 6)

распределения и проникновения шлака в поры огнеупорного материала.

Взаимодействие шлака с футеровкой следует рассматривать с учетом поверхностных свойств и смачиваемости, величина которых зависит от химического состава шлака. Следует заметить, что этот анализ не является достаточным, а для полного описания явлений, происходящих в шлаке, следует учитывать процесс смачивания магнийсодержащих частиц жидким шлаком, насыщенным MgO .

Исследования химического состава и микроструктуры образца конвертерного шлака методом сканирующей электронной микроскопии и флуоресцентным методом показали присутствие CaO , MgO , SiO_2 и FeO . Доли отдельных компонентов являются типичными для конвертерных шлаков. Установлено, что для оптимизации процесса разбрызгивания шлака необходима корректировка химического состава путем обогащения его MgO .

Библиографический список

1. **Калиш, Д.** Исследования физико-химических свойств шлака при его разбрызгивании на футеровку

кислородного конвертера / Д. Калиш, В. О. Синельников, К. Куглин // Новые огнеупоры. — 2017. — № 3. — С. 78–83.

Kalisz, D. Investigation of the physicochemical properties of slag splashed on the lining of an oxygen converter / D. Kalisz, V. O. Sinelnikov, K. Kuglin // *Refract. Ind. Ceram.* — 2018. — Vol. 55, № 5. — P. 463–468. DOI: 10.1007/s11148-018-0128-1.

2. Sinelnikov, V. O. Influence the FeO content on slag viscosity at his spraying. Increase the life of the refractory lining / V. O. Sinelnikov, D. Kalisz // *Glass Ceram.* — 2016. — Vol. 73, № 3/4. — P. 144–148. DOI: 10.1007/s10717-016-9844-5.

3. Mills, K. C. A Review of slag splashing / K. C. Mills, Y. Su, A. B. Fox [et al.] // *ISI International*. — 2005. — Vol. 45, № 5. — P. 619–633. DOI: 10.2355/isijinternational.45.619.

4. Sinelnikov, V. O. Influence of hydrodynamic and temperature conditions on the efficiency of the slag splashing method / V. O. Sinelnikov, D. Kalisz, R. D. Kuzemko // *Journal of Machine Construction and Maintenance. Problemy Eksploatacji.* — 2017. — Vol. 105, № 2. — P. 93–98.

5. Kalisz, D. Viscosity calculation of mold slag in continuous casting / D. Kalisz // *Archives of Materials Science and Engineering.* — 2012. — Vol. 58, № 2. — P. 164–170.

6. Barron, M. A. Slag splashing in a basic oxygen furnace under different blowing conditions / M. A. Barron, H. Isaias, D. Y. Medina // *Open Journal of Applied Sciences.* — 2015. — № 5. — P. 819–825. DOI: 10.4236/ojapps.2015.512078.

7. Kharlashin, P. S. Influence of different factors and physical impacts on the power of flowing supersonic jet during slag spraying in the converter / P. S. Kharlashin, R. D. Kuzemko, V. O. Sinelnikov // *New developments in mining engineering.* — 2015. — P. 597–602.

8. Kuzemko, R. D. Analysis of the flow of gas/powder mixture in the oxygen converter lance nozzles / R. D. Kuzemko, V. O. Sinelnikov, V. V. Mastykash, D. Kalisz // *Journal of Machine Constuction and Maintenance.* — 2018. — Vol. 108, № 1. — P. 111–117.

9. Sinelnikov, V. O. Modeling viscosity of converter slag / V. O. Sinelnikov, D. Kalisz // *Archives of foundry engineering.* — 2015. — Vol. 15, № 4 (Special Issue). — P. 119–124.

10. Kharlashin, P. S. Influence of preliminary heating of nitrogen on gas ejection into the converter / P. S. Kharlashin, A. B. Kovura, R. D. Kuzemko // *Steel in Translation.* — 2011. — Vol. 41, № 9. — P. 745–748. DOI: 10.3103/S0967091211090087.

11. Messina, C. J. The worldwide status of BOF slag splashing practices and performance / C. J. Messina, J. R. Paules // *In Proceedings of the 79th Steelmaking Conference.* — 1996. — P. 153–155.

12. Ciechanowska, M. Model research of the maintenance of the refractory lining of the BOF with «slag splashing» method / M. Ciechanowska, J. Pieprzycza // *Hutnik Wiadomości Hutnicze.* — 2014. — Vol. 81, № 3/4. — P. 136–141.

13. Bodsworth, C. The extraction and refining of metals / C. Bodsworth. — Middlesex : CRC Press Taylor & Francis Group, 1994. — 386 p.

14. Yildirim, I. Z. Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag / I. Z. Yildirim, M. Prezzi // *Advances in Civil Engineering.* — 2011. — Vol. 2011. — P. 1–13. DOI: 10.1155/2011/463638.

15. Zhao, J. Comparasion of grinding characteristics of converter steel slag with and without pretreatment and grinding aids / J. Zhao, D. Wang, P. Yan, W. Lei // *Applied Sciences.* — 2016. — Vol. 236, № 6. — P. 1–15. DOI: 10.3390/app6110237.

16. Vilciu, I. Diffractometric analyse of steel slags viewing their use for road construction / I. Vilciu, M. Nicolae, M. D. Stoica // *Annals of Faculty Engineering Hunedoara, International Journal of Engineering.* — 2011. — № 9. — P. 145–148.

17. Chen, M. Viscosity measurments of SiO₂–FeO–CaO system with equilibrium with metallic Fe / M. Chen, B. Zhao // *Metall. Mater. Trans. B.* — 2015. — Vol. 46, № 2. — P. 577–584. DOI: 10.1007/s11663-014-0241-6.

18. Zhao, J.-C. Methods for phase diagram determination / J. -C. Zhao. — Oxford : Elsevier, 2007. — 520 p. DOI: 10.1016/B978-0-08-044629-5.X5000-9.

19. Tayeb, M. A. MgO solubility in steelmaking slag / M. A. Tayeb, A. N. Assis, S. Sridhar, R. J. Fruchan // *Metall. Mater. Trans. B.* — 2015. — Vol. 46, № 3. — P. 1112–1114. DOI: 10.1007/s11663-015-0352-8.

20. Montecinos, R. A. MgO saturation analisys of CaO–SiO₂–FeO–MgO–Al₂O₃ slag system / R. A. Montecinos de Almeida, D. Vieira, W. V. Bielefeldt, A. C. Faria Viela // *Materials Research.* — 2018. — Vol. 21, № 1. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2017-0041.

21. Borecki, M. New slag-forming material for MgO content control in steelmaking slag / M. Borecki // *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza.* — 2010. — Vol. 62, № 1. — P. 180–184.

22. Kalisz, D. Modelowanie procesu rafinacji i wprowadzania azotu w stalach elektrotechnicznych / D. Kalisz. — Kraków : Wydawnictwo Naukowe Akapit, 2012. — 88 p.

23. Francik, P. Wybrane aspekty stosowania materiałów odpadowych w procesie spiekania rud żelaza / P. Francik, D. Burchart-Korol // *Hutnik-Wiadomości Hutnicze.* — 2016. — Vol. 73, № 8/9. — P. 388–394.

24. Jończy, I. Składniki fazowe wybranych mineralnych surowców odpadowych w obrazach mikroskopowych / I. Jończy, J. Nowak, A. Porszke, E. Strzałkowska. — Gliwice : Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2012. — 200 p.

25. <http://ispatguru.com/89/> (2018.04.29).

26. Mazanek, T. Podstawy teoretyczne metalurgii żelaza / T. Mazanek, K. Mamro. — Katowice : Wydawnictwo Śląsk, 1969. — 351 p.

27. Kawecka-Cebula, E. Filtration of non-metallic inclusion in steel / E. Kawecka-Cebula, Z. Kalicka, J. Wypartowicz // *Archives of Metallurgy and Materials Science.* — 2006. — Vol. 51, № 2. — P. 261–268.

28. Kalisz, D. Modeling physicochemical properties of mold slag / D. Kalisz // *Archives of Metallurgy and Materials Science.* — 2014. — Vol. 59, № 1. — P. 149–155. ■

Получено 24.07.18

© В. О. Синельников, Д. Калиш,
Р. Д. Куземко, 2018 г.