

Е.Н. Сигарев, д-р техн. наук, зав. кафедрой металлургии черных металлов, e-mail: en_sigarev@ua.fm

Н.Н. Недбайло, аспирант кафедры металлургии черных металлов

А.А. Похвалитый, ст. преподаватель кафедры металлургии черных металлов

А.В. Довженко, аспирант кафедры металлургии черных металлов

Днепропетровский государственный технический университет, г. Каменское, Украина

Исследование влияния тугоплавких частиц в шлаке на адгезию к огнеупору

В статье теоретически и экспериментально обоснована возможность регулирования соотношения низко- и высокотемпературных фаз в конечном конвертерном шлаке путем присадки оксидов кальция и магния, а также влияние добавки тугоплавких частиц различных фракций на изменение краевого угла смачивания и адгезию шлака к поверхности периклазоуглеродистого огнеупора.

Ключевые слова: футеровка, адгезия, гарнисаж, конвертер, шлак.

Введение. Эффективным способом для повышения стойкости периклазоуглеродистой футеровки кислородных конвертеров на современном этапе развития технологии остается прием раздувки газовыми струями модифицированного магниезальными добавками конечного конвертерного шлака, который кристаллизуется с формированием на рабочей поверхности огнеупоров агрегата шлако- и термостойчивого гарнисажного слоя. Физико-химическое состояние и температура плавления шлака, который раздувается, краевой угол смачивания и величина работы адгезии к поверхности огнеупора непосредственно влияют на динамику и интенсивность формирования гарнисажного слоя заданной толщины [1].

Авторами работы [2] установлено, что конвертерный шлак, содержащий более 48 % CaO при 6–8 % MgO, не обеспечивает формирования слоя гарнисажа на периклазоуглеродистой футеровке, устойчивого к эрозии, в результате нахождения на 90 % в зоне насыщения CaO, и содержит значительное количество CaO·Fe₂O₃ и 2CaO·Fe₂O₃ с температурой плавления 1215 и 1440 °С соответственно. Повышение содержания MgO в шлаке до 10 % при снижении CaO до 41,8 % перед раздувкой позволяет сместить состав шлака в область насыщения MgO, с образованием высокотемпературной фазы MgO·Fe₂O₃ (1750 °С) и серии твердых растворов оксидов магния и железа с температурой плавления около 2000 °С. Доля магнезиоферита и магнезиовюстита в этом случае достигает 15–25 %, а легкоплавкой фазы и CaO·Fe₂O₃ сокращается до 3–7 % [2].

В соответствии с данными работы [3], легкоплавкие фазы с повышенным содержанием FeO обеспечивают адгезию между шлаком и огнеупором, а тугоплавкие фазы – сопротивление эрозии и тепловому воздействию. Необходимо отметить, что в ходе исследования износа MgO-C огнеупоров [4] были идентифицированы зерна оксида магния, отделившиеся от огнеупора и погруженные в шлак. Показано, что жидкоподвижный шлак проникает во внутризерновую силикатную связку

между зернами MgO, ускоряет образование низкотемпературных фаз и облегчает извлечение (вымывание) огнеупорных зерен из матрицы огнеупора.

В результате исследований по определению адгезии шлаков различного химического состава к огнеупорам конвертера [5], показана возможность адгезии шлака к частицам MgO в MgO-C огнеупора, при этом не обнаружены признаки реакций между указанными частицами в образцах огнеупора и слое нанесенного шлака. В то же время, установлено образование газового промежутка на поверхности раздела между слоем шлака и MgO-C матрицей огнеупора и гранулы железа в слое шлака при высоком содержании (FeO).

Авторами работы [6] исследовано влияние основности на растворимость оксидов магния в шлаке. Показано, что основное влияние на растворимость MgO оказывает состав шлака и особенно показатель его основности (CaO) / (SiO₂). Влияние оксидов железа на растворимость MgO неоднозначно. Fe₂O₃ связывает MgO в ферриты, тем самым снижая активность оксида магния и повышая его растворимость. Закись железа, с одной стороны, увеличивает долю свободного кислорода и, соответственно, активность MgO, что должно снижать растворимость последнего. В то же время, с другой стороны, ионы Fe²⁺ концентрируются главным образом в RO-подсистеме, уменьшая ионную долю катионов магния и, соответственно, активность MgO. Превалирующее влияние той или иной тенденции определяется основностью шлака, общим содержанием и соотношением в нем двух- и трехвалентного железа. Шлаки конвертерной плавки характеризуются увеличением растворимости MgO с повышением содержания оксидов железа.

В целом, положительные результаты по повышению устойчивости гарнисажного слоя достигаются [4] при перенасыщении шлака MgO (до 10–14 %) в конце продувки в конвертере, что обеспечивает повышенное содержание дисперсной твердой фазы и способность шлака образовать слой гарнисажа надлежащей толщины.

Формирование прочного и термоустойчивого гарнисажного слоя обеспечивается при условиях достижения рационального химического состава шлака, насыщенного MgO, наличии высокотемпературной фазы $MgO \cdot Fe_2O_3$ и твердых растворов с различными пропорциями MgO и FeO (с температурой плавления на уровне 2000 °C).

Как показано выше, повышение адгезионной способности конвертерного шлака к периклазоуглеродистому огнеупору может быть обеспечено за счет регулирования соотношения низко- и высокотемпературных фаз в гарнисажном слое. Вследствие хорошего смачивания конвертерным шлаком поверхности MgO-C огнеупора работа его адгезии к зернам периклаза приближается к удвоенному поверхностному натяжению шлака и составляет от 460 до 495 МДж/м². Такое значение работы адгезии может приводить к вымыванию кристаллов периклаза из огнеупора движущимся потоком шлакометаллической эмульсии, образующейся при продувке металла кислородом в ходе конвертерной плавки.

Постановка задачи. По ходу нанесения шлаковой пленки и после раздувки шлаковой ванны на границе «шлак-огнеупор» формируется гарнисажный слой, в котором оксид железа, по мере повышения его концентрации, снижает вязкость шлака и разрушает силикатную сеть огнеупора, что ускоряет обезуглероживание матрицы в соответствии с реакцией $(FeO) + C_{ТВ} = Fe_{мет} + \{CO\}$. Окисление графита матрицы повышает пористость рабочего слоя огнеупора, в результате чего шлак проникает в объем последнего и способствует дальнейшему вымыванию зерен периклаза в шлак. В свою очередь, железо восстанавливается из оксидов, диффундирует в зерна MgO и ускоряет образование магниевого вюстита. Образовавшаяся фаза снижает огнеупорность зерен оксида магния, обеспечивая косвенное растворение его зерен и развитие так называемой «пассивной» коррозии.

Интенсивность движения слоя шлака, который стекает по вертикально расположенной поверхности огнеупора по ходу раздувки шлаковой ванны газовыми струями, согласно работам Охотского В.Б., пропорциональна вязкости и степени отклонения шлака от состояния насыщения его MgO и может быть определена по выражению: $(MgO)_{нас} = 0,987(MgO)_p_{нас} + 3,06$.

Расчеты, выполненные авторами настоящего исследования с использованием приведенного выше выражения, показали, что с повышением температуры (в диапазоне 1550–1650 °C) и основности шлака с 2,0 до 3,5 значения $(MgO)_{нас}$ изменяются в пределах 7,4–8,8 %. Для условий работы конвертеров конвертерного цеха ПАО «Днепропетровский меткомбинат», при использовании по ходу плавки доломитизированной извести, этот показатель для конечного шлака несколько выше – 8,2–9,3 %, что способствует повышению стойкости футеровки, но приводит к осложнениям с точки зрения обеспечения надлежащей степени десульфурации и дефосфорации стали по ходу конвертерной плавки.

Основные шлаки при температурах свыше 1600 °C имеют кажущуюся вязкость примерно на по-

рядок выше, чем вязкость жидкой стали, и возможность свободного течения по футеровке конвертера с соответствующей температурой. Вязкость насыщенных известью высокоосновных шлаков в температурном интервале завершающего этапа плавки (1650–1700 °C) в среднем в 1,56 раз выше вязкости низкоосновных шлаков. Известно также [7], что существенно повышается вязкость шлака при наличии в нем во взвешенном состоянии нерастворенных частиц размером 10^{-3} - 10^{-2} мм, которые вызывают увеличение внутреннего трения и уменьшают скорость движения шлаковой пленки по футеровке. В высокоосновном конвертерном шлаке такими твердыми частицами могут быть частицы MgO, CaO, Cr_2O_3 и другие.

Необходимо отметить, что достоверные сведения об условиях растекания по поверхности, величине работы адгезии и изменении краевого угла смачивания периклазоуглеродистого огнеупора конвертерным шлаком, в зависимости от состава последнего, в том числе модифицированного магниезальными добавками перед раздуванием на футеровку, крайне ограничены.

Целью исследований было определение возможности прецизионного регулирования соотношения низко- и высокотемпературных фаз в конечном конвертерном шлаке путем внесения дополнительного количества оксидов кальция и магния, определение величины работы адгезии, а также влияния присадок тугоплавких твердых добавок различных фракций на изменение краевого угла смачивания (Θ) шлаком поверхности периклазоуглеродистого огнеупора.

Результаты работы. Исследование поверхностных явлений в системе «конвертерный шлак-периклазоуглеродистый огнеупор» проводили с использованием экспериментального комплекса на основе печи Таммана, оптического пирометра ЭОП-66 и контрольно-измерительных приборов в условиях сталеплавильной лаборатории кафедры металлургии черных металлов Днепропетровского государственного технического университета.

Для подготовки и проведения экспериментов использованы основные положения методики определения поверхностного натяжения методом лежащей капли [8].

С использованием метода планирования эксперимента реализован полный факторный эксперимент. В образцы порошкообразного конечного конвертерного шлака исходного химического состава, %: CaO – 45,1; MgO – 3,9; SiO₂ – 16,5; FeO + Fe₂O₃ – 26,3, присаживали порции чистых порошкообразных CaO (X_1) и MgO (X_2), в соответствии с планом эксперимента (табл. 1).

Исследуемый образец модифицированного добавками оксидов Ca и Mg конвертерного шлака (табл. 1), изготовленный в виде цилиндра диаметром 8 мм и высотой 10 мм, устанавливали на подложку. Использовали подложку, изготовленную из обожженного, извлеченного из рабочего слоя футеровки кислородного конвертера после завершения кампании, периклазоуглеродистого огнеупора (марки PC-14F). Подложку с образцом шлака устанавливали в рабо-

План и результаты экспериментов по определению краевого угла смачивания поверхности огнеупора конечным конвертерным шлаком, модифицированным добавками

№	$X_1, \%$		$X_2, \%$		$X_3, \text{мм}^*$		$\theta, \text{град.}$		$\theta_{\text{сред.}}^{\text{г}}$ град.	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1 X_2 X_3$
	к.	нат.	к.	нат.	к.	нат.	θ_{min}	θ_{max}					
1	-	5,0	-	5,0	-	0,8	84,9	71,2	78,05	+	+	+	-
2	+	20,0	-	5,0	-	0,8	62,9	72,7	67,80	-	-	+	+
3	-	5,0	+	10,0	-	0,8	84,8	68,1	76,45	-	+	-	+
4	+	20,0	+	10,0	-	0,8	83,8	74,1	78,95	+	-	-	-
5	-	5,0	-	5,0	+	3,3	64,8	63,4	64,10	+	-	-	+
6	+	20,0	-	5,0	+	3,3	68,0	70,9	69,45	-	+	-	-
7	-	5,0	+	10,0	+	3,3	75,8	79,2	77,50	-	-	+	-
8	+	20,0	+	10,0	+	3,3	74,9	71,8	73,35	+	+	+	+

Примечание: * средний диаметр частиц в фракции; к. – кодированные, нат. – натуральные

чей зоне печи Таммана с графитовым тиглем. Печь закрывали, и пропускали через реакционное пространство азот для соответствия условиям в рабочем пространстве конвертера при проведении операции ошлакования футеровки нанесением шлакового гарнисажа путем раздувания конечного шлака азотом.

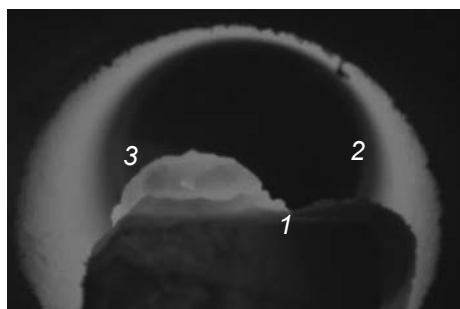
В серии экспериментов с дополнительным вводом в объем шлака твердых тугоплавких частиц подготовка шлака заключалась в добавке частиц на основе оксида Mg (X_3) различных фракций (диаметром от 0,83 до 3,60 мм, табл. 1). Целью ввода тугоплавких частиц являлось исследование их влияния (в качестве замедлителей движения или дополнительных «центров кристаллизации» шлака) на растекание капли шлака по поверхности огнеупора. Количество тугоплавких добавок составляло 8 % от массы образца шлака.

Процесс нагревания, плавления образца шлака и растекания капли шлака по поверхности огнеупор-

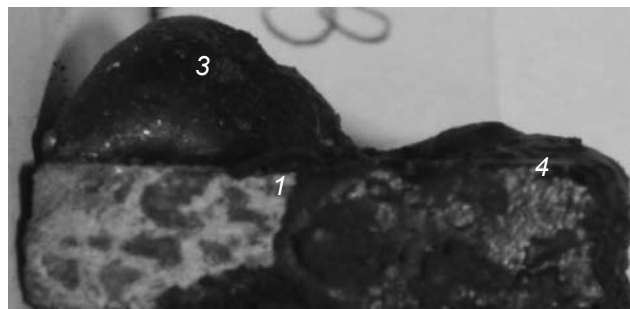
ной подложки фиксировали с помощью цифровой видеокамеры CASIO FX-25. Температуру плавления образцов шлака определяли с использованием оптического пирометра. Для анализа полученных результатов применяли мультимедийный плеер и диспетчер рисунков «Microsoft Office».

Определение характера смачивания и растекания шлака по поверхности огнеупора (рис. 1, а, б) выполняли с использованием снимков, где фиксировали во времени различные стадии процесса (начало плавления, растекания жидкой фазы, динамику растекания шлака и т. д.).

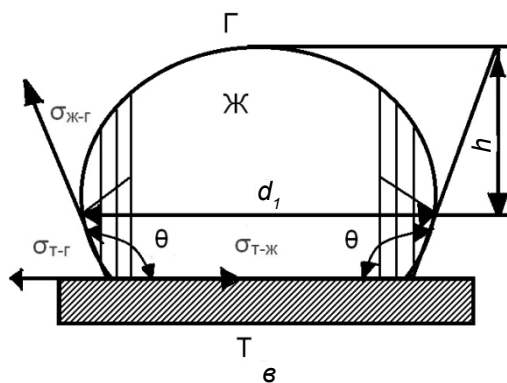
Для определения поверхностных характеристик проводили измерения геометрических размеров капли шлака на поверхности огнеупора (рис. 1, в). Краевой угол смачивания измеряли с точностью до 0,5°, а линейные размеры капли шлака – с точностью до 0,1 мм.



а



б



в

Рис. 1. Картина плавления (а), растекания капли шлака по поверхности огнеупора (б) и схема определения краевого угла смачивания (в): 1 – подложка из огнеупора; 2 – тигель печи; 3 – капля шлака; 4 – слой шлака на поверхности огнеупора; d_1 – максимальный диаметр капли шлака; h – расстояние от максимального диаметра до вершины капли; θ – краевой угол смачивания; $\sigma_{ж-г}$ – поверхностное натяжение на границе раздела «шлак – газ»; $\sigma_{т-ж}$ – поверхностное натяжение на границе раздела «огнеупор – шлак»; $\sigma_{т-г}$ – поверхностное натяжение на границе «огнеупор – газ»

Результаты определения краевых углов смачивания поверхности огнеупора конечным конвертерным шлаком, модифицированным добавками твердых частиц, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения угла смачивания поверхности огнеупора модифицированным конвертерным шлаком с добавлением твердых частиц MgO различных фракций

№	X ₃ , мм	θ _р , град.		θ _{сред.} , град.
		θ _{min}	θ _{max}	
1	3,0–3,6	84,0	90,0	87,0
2	2,0–3,0	11,0	28,9	19,95
3	1,0–2,0	31,4	41,7	36,55
4	0,63–1,0	20,9	57,1	39,0

Величины значимости коэффициентов, определенные по выражению $a_i = |b_i \cdot \Delta\theta|$, подтвердили известное предположение, что для конвертерного шлака, в исследованном диапазоне химического состава, наиболее существенным фактором изменения краевого угла смачивания является содержание CaO ($a_i = 46,125$).

Постепенная миграция химического состава модифицированного шлака (табл. 1), с увеличением содержания CaO и MgO, в области с повышенной температурой плавления (рис. 2), свидетельствует в пользу предложенного способа [9] рассредоточения во времени введения добавок-модификаторов по ходу раздувки шлаковой ванны с целью предотвращения быстрого перевода последней в малоподвижное состояние с прекращением выноса шлаковых капель.

Макроструктуры зоны контакта «шлак – огнеупор» для исходного конвертерного шлака (а) и распределение твердых частиц в полученных расплавлении на подложке каплях шлака, модифицированного

присадками тугоплавких частиц MgO фракций 0,63–1,0 мм (б) и 2,0–3,0 мм (в) соответственно, приведены на рис. 3.

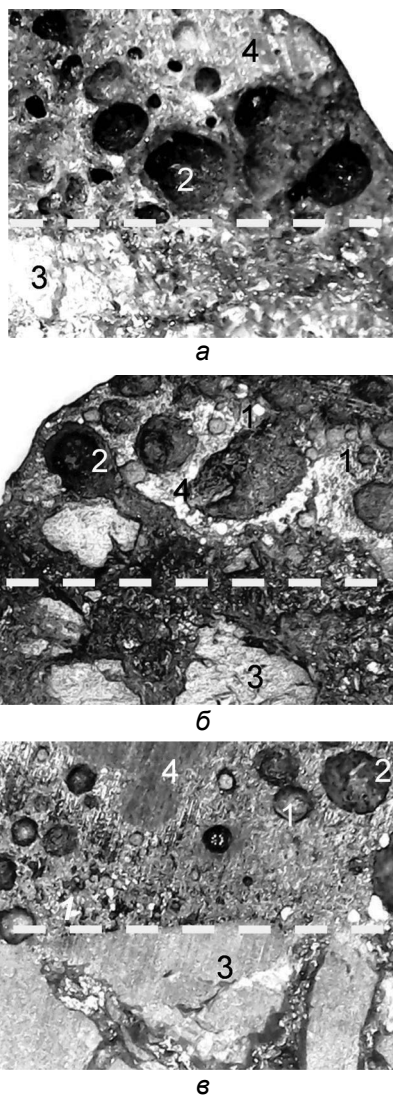


Рис. 3. Макроструктура зоны контакта образцов исходного (а) и модифицированного добавками (б, в) тугоплавких частиц (табл. 2) конвертерного шлака: 1 – тугоплавкие частицы; 2 – поры в слое шлака; 3 – зерна MgO в огнеупорной подложке; 4 – шлак; ----- граница контакта «шлак – огнеупор»

Газового промежутка между шлаком и рабочей поверхностью огнеупора, в отличие от результатов работы [5], не обнаружено, что, по-видимому, связано с недостаточным промежутком времени выдержки образца шлака в печи после его расплавления и, вследствие этого, ограничениями условий для развития обезуглероживания матрицы MgO-C.

По результатам обработки экспериментальных данных, получена математическая модель для описания взаимосвязи изменения концентрации CaO и MgO в шлаке с краевым углом смачивания:

$$\theta = 94,008 - 3,69 \cdot \text{CaO} - 2,072 \cdot \text{MgO} + 0,362 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO}, \quad (1)$$

и модель для определения влияния размера твердых тугоплавких добавок (табл. 2) на изменение краевого угла смачивания шлаком поверхности огнеупора:

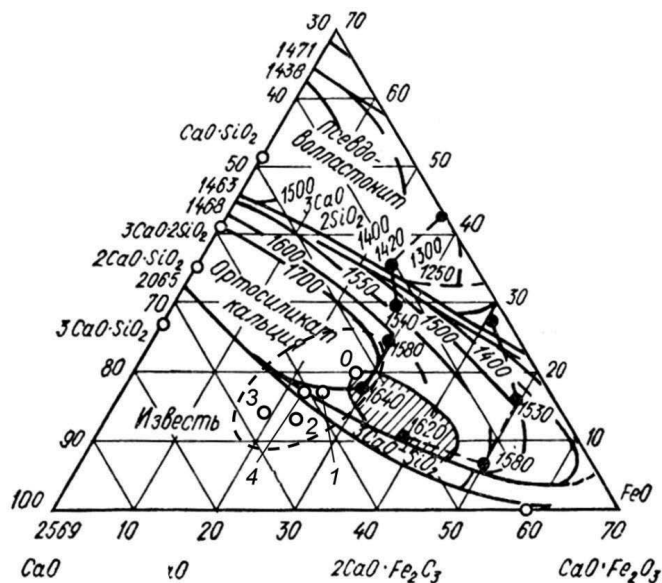


Рис. 2. Изменение химического состава конвертерного шлака при добавлении CaO и MgO в исходный конвертерный шлак (т. «0» на диаграмме). Цифры у выделенных на диаграмме точек соответствуют номерам состава экспериментального шлака (табл. 1)

$$\theta = 101,295 - 2,37 \cdot \text{CaO} - 2,676 \cdot \text{MgO} - 27,68 \cdot D + 0,2686 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO} + 1,674 \cdot \text{CaO} \cdot D + 2,985 \cdot \text{MgO} \cdot D - 0,197 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot D. \quad (2)$$

Результаты расчетов по уравнению (1) в виде поверхности отклика, которая характеризует влияние изменения содержания CaO и MgO в шлаке (табл. 1), на краевой угол смачивания шлаком поверхности огнеупора, приведены на рис. 4.

Поверхность отклика, полученная с использованием выражения (2), характеризующая комплексное воздействие содержания CaO, MgO и размера тугоплавких частиц в модифицированном шлаке для фракций 0,63–1,0 мм и 3,0–3,6 мм (табл. 2) на изменение краевого угла смачивания шлаком поверхности периклазоуглеродистого огнеупора, представлена на рис. 5 и рис. 6 соответственно.

В результате исследований установлено, что ввод твердых частиц MgO фракции 0,63–1,0 мм в шлак имеет большее влияние на вязкость и динамику растекания последнего по поверхности огнеупора, что, в целом, соответствует выводам работы [7].

Установленное по результатам экспериментов разнонаправленное влияние размера твердых частиц MgO (рис. 5, рис. 6) на угол смачивания шлаком огнеупора требует проведения дополнительных исследований.

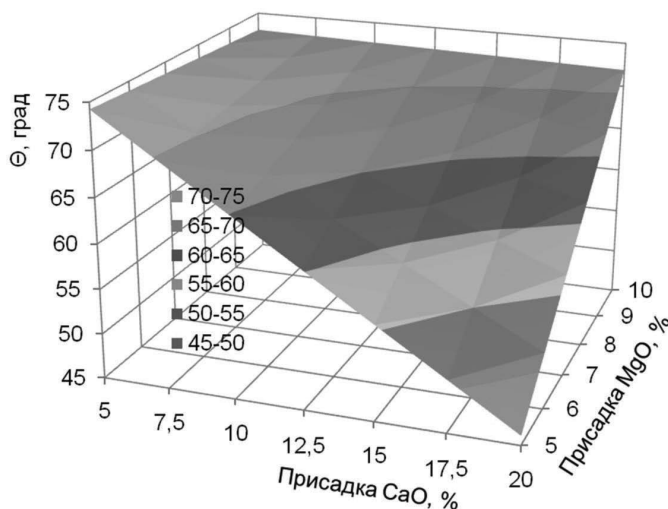


Рис. 4. Поверхность отклика, характеризующая влияние присадки CaO и MgO в шлак (табл. 1) на изменение краевого угла смачивания шлаком поверхности огнеупора

В результате выполненных исследований подтверждено, что содержание CaO, MgO и соотношение низко- ($\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) и высокотемпературных ($\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) фаз в модифицированном шлаке существенно влияют на смачивание шлаком поверхности периклазоуглеродистого огнеупора.

По данным экспериментов, наибольшее влияние на условия смачивания огнеупора модифицированным шлаком (табл. 1, 2), имеют следующие факторы:

- размеры присаживаемых в шлак твердых тугоплавких частиц. Введение в объем шлака тугоплавких частиц фракции более 3,0 мм приводит к перманентному увеличению краевого угла смачивания

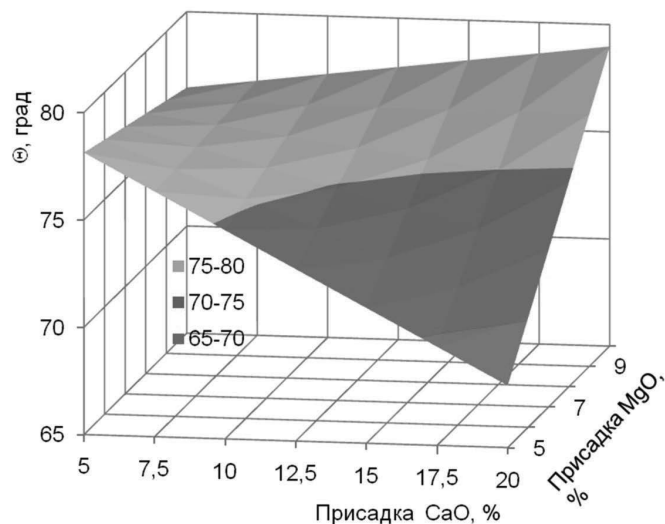


Рис. 5. Поверхность отклика, характеризующая влияние присадки твердых частиц MgO фракции 0,63–1,0 мм на изменение краевого угла смачивания шлаком поверхности огнеупора (табл. 2)

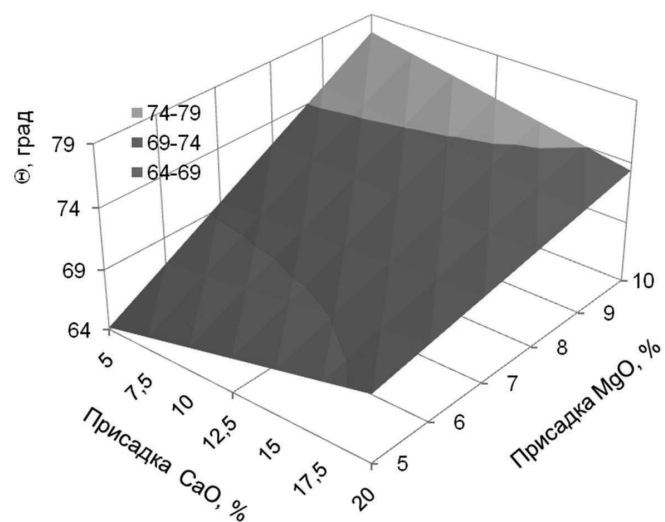


Рис. 6. Влияние присадки твердых частиц MgO фракции 3,0–3,6 мм на изменение краевого угла смачивания шлаком поверхности огнеупора

последним огнеупора и может негативно влиять на растекание жидкого шлака по его поверхности при формировании гарнисажного слоя;

- повышение содержания оксида магния в шлаке более 12 % приводит к росту величины краевого угла смачивания до 75–80 град., что также не способствует достижению плотного равномерного покрытия гарнисажным слоем поверхности огнеупора.

Изменение величины работы адгезии определяли следующим образом. Поверхностное натяжение шлака на границе «шлак – газ» определяли с использованием выражения:

$$\sigma_{\text{ж-г}} = d^2 \cdot 1/H \cdot \Delta\rho \cdot g, \quad (3)$$

где d^2 – экваториальный диаметр капли, см; $1/H$ – функция, зависящая от отношения диаметра капли к ее высоте; $\Delta\rho$ – плотность образца шлака при температуре плавления, г/см³.

Величину работы адгезии модифицированного шлака (табл. 1) оценивали с использованием уравнения [8]:

$$A_{\text{адг}} = \sigma_{\text{ж-г}} \cdot (1 + \cos\theta), \quad (4)$$

с учетом величины краевого угла смачивания, определенного по выражению (2), а работу когезии – по выражению:

$$A_{\text{ког}} = 2\sigma_{\text{ж-г}} \quad (5)$$

Результаты расчетов работы адгезии для модифицированного шлака с добавками частиц фракции 0,63–1,0 мм (табл. 2) представлены на рис. 7.

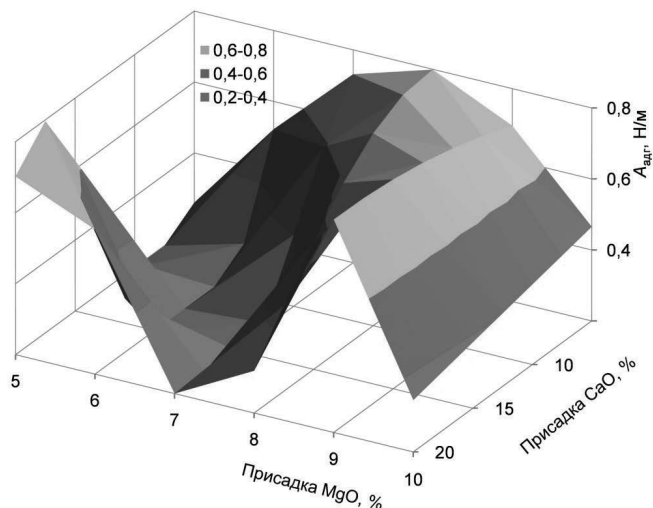


Рис. 7. Поверхность отклика, характеризующая влияние изменения химического состава и ввода твердых частиц MgO фракции 0,63–1,0 мм в шлак на работу адгезии шлака к огнеупору

Установлено, что использование твердых тугоплавких частиц различных фракций в качестве присадки к шлаку, приводит к изменению величины работы адгезии от 0,2 до 0,8 Н/м, в зависимости от соотношения CaO и MgO в шлаке и, в целом, отражает влияние исследованных факторов (табл. 1) на условия формирования гарнисажного шлакового покрытия.

Управлять фактором адгезии, в условиях небольшого диапазона колебаний величины $A_{\text{ког}}$, возможно путем изменения величины поверхностной энергии рабочего слоя огнеупора. Это условие обеспечива-

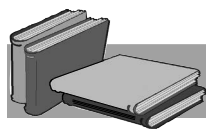
ется при увеличении площади контакта между нанесенным слоем гарнисажного шлака и периклазоуглеродистым огнеупором по ходу выгорания графита матрицы с образованием CO и повышением пористости рабочей поверхности огнеупора.

Полученные в ходе исследований данные и модели могут быть использованы для прецизионного регулирования соотношения низко- и высокотемпературных фаз в конечном конвертерном шлаке перед раздувкой последнего на футеровку конвертера.

Выводы

С использованием метода планирования экспериментов выполнены высокотемпературные исследования по определению возможности изменения химического состава и свойств конечного конвертерного шлака перед нанесением на рабочую поверхность периклазоуглеродистого огнеупора раздувкой шлаковой ванны азотными струями. За счет внесения дополнительного количества оксидов кальция и магния обеспечено изменение соотношения низко- и высокотемпературных фаз в шлаке, изучено влияние дополнительной присадки тугоплавких твердых частиц различных фракций на изменение краевого угла смачивания модифицированным шлаком огнеупора.

Получены математические модели для расчета влияния содержания CaO, MgO и размера присаживаемых в шлак твердых тугоплавких частиц на основе оксида магния на изменение краевого угла смачивания шлаком поверхности периклазоуглеродистого огнеупора. Показана целесообразность использования твердых тугоплавких добавок к конвертерному шлаку перед раздуванием для предотвращения стекания шлаковой пленки по поверхности огнеупора по ходу формирования гарнисажного слоя. Установлено, что использование тугоплавких частиц различного фракционного состава, приводит к изменению величины работы адгезии шлака к огнеупору в диапазоне от 0,2 до 0,8 Н/м, в зависимости от содержания CaO и MgO в шлаке. К наиболее рациональному диапазону, в исследованных условиях, можно отнести фракцию твердых частиц MgO диаметром 1,0–3,0 мм.

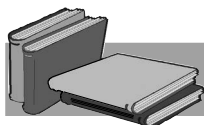


ЛИТЕРАТУРА

1. Сигарев Е.Н., Сокол А.Н., Недбайло Н.Н. Компьютерное моделирование теплового состояния системы «гарнисаж – футеровка» с учетом неравномерности ее толщины // *Математическое моделирование*. – 2016. – № 2 (35). – С. 70–73.
2. Sian C., Wenyan Y., Conglie Z. Slag splashing for BaoSteel's 300 metricton BOF and crystallographic structure of its slag // *Iron and Steelmaker*. – 2000. – № 7. – P. 39–41.
3. Использование высокомагнезиальных шлаков в конвертерной плавке / К.Н. Демидов, А.М. Ламухин, О.Ф. Шатилов и др. // Труды VII конгресса сталеплавателей, г. Магнитогорск, 15–17 октября 2002 г. – М.: ОАО «Черметинформация», 2003. – С. 186–193.
4. Обст К.-Х., Шюрман Э., Ман Г., Нолле Д. О растворимости окиси магния в кислородно-конвертерных шлаках // *Черные металлы*. – 1980. – № 20. – С. 23–28.
5. Yuan Z., Wu Y., Zhao H., Matsuura H., Tsukihashi F. Wettability between molten slag and MgO-C refractories for slag splashing process // *ISIJ International*. – 2013. – Vol. 53. – № 4. – P. 598–602.

6. Тахаутдинов Р.С. Производство стали в кислородно-конвертерном цехе Магнитогорского металлургического комбината. – Магнитогорск, 2001. – 148 с.
7. Физические свойства шлаков, вязкость. URL: http://emchezgia.ru/fizhim/7_fiz_svoistva_shlakov.php.
8. Патент України на корисну модель № 129813 «Спосіб нанесення шлакового гарнісажу на футерівку конвертерів комбінованого дуття» // Винахідники: Сігарьов Є.М., Пантейков С.П., Недбайло М.М., Байдуж Ю.В., Чубіна О.А. – власник: Дніпровський державний технічний університет. – Дата подання 29.05.2018, дата, з якої чинні права 12.11.2018, публікація відомостей 12.11.2018, Бюл. № 21.
9. Кошевник А.Ю., Кусанов М.М., Лубман Н.М. Измерение поверхностного натяжения по размерам лежащей капли // Журнал физической химии. – 1953. – Т. XXVII, Вып. 12. – С. 1887–1890.

Поступила 22.10.2018



REFERENCES

1. Sigarev, E.N., Sokol, A.N., Nedbailo, N.N. (2016). Computer modeling of the thermal state of the “garbage-lining” system, taking into account the unevenness of its thickness. *Mathematical modeling*, no. 2 (35), pp. 70–73 [in Russian].
2. Sian, C., Wenyan, Y., Conglie, Z. (2000). Slag splashing for BaoSteel's 300 metricton BOF and crystallographic structure of its slag. *Iron and Steelmaker*, no. 7, pp. 39–41 [in English].
3. Demidov, K.N., Lamukhin, A.M., Shatilov, O.F. et al. (2003). Use of high-magnesia slags in converter smelting. Proceedings of the VII Congress of Steelmakers. Magnitogorsk, October 15–17, 2002. Moscow: JSC “Chermetinformation”, pp. 186–193 [in Russian].
4. Obst, K.-H., Shurman, E., Man, G., Nolle, D. (1980). On the solubility of magnesium oxide in oxygen-converter slags. *Black metals*, no. 20, pp. 23–28 [in Russian].
5. Yuan, Z., Wu, Y., Zhao, H., Matsuura, H., Tsukihashi, F. (2013). Wettability between molten slag and MgO-C refractories for slag splashing process. *ISIJ International*, Vol. 53, no. 4, pp. 598–602 [in English].
6. Takhautdinov, R.S. (2001). Steel production in the oxygen-converter shop of the Magnitogorsk Iron and Steel Works. Magnitogorsk, 148 p. [in Russian].
7. Physical properties of slags, viscosity. URL: http://emchezgia.ru/fizhim/7_fiz_svoistva_shlakov.php [in Russian].
8. Sigarev, E.N., Panteykov, S.P., Nedbaylo, N.N., Baiduzh, Yu.V., Chubin, K.I. (2018). Method of applying slag on lining of converters of combined blast. Patent of Ukraine no. 129813. Owner: Dniprovsky State Technical University. Filing date 29.05.2018, date from which valid rights 12.11.2018, publication of information 12.11.2018, Bull. no. 21 [in Ukrainian].
9. Koshevnik, A.Yu., Kusanov, M.M., Lubman, N.M. (1953). Measurement of the surface tension by the dimensions of a falling drop. *Journal of Physical Chemistry*, Vol. XXVII, Iss. 12, pp. 1887–1890 [in Russian].

Received 22.10.2018

Анотація

Є.М. Сігарьов, д-р техн. наук, зав. кафедри металургії чорних металів, e-mail: en_sigarev@ua.fm; **М.М. Недбайло**, аспірант кафедри металургії чорних металів; **А.А. Похвалітій**, ст. викладач кафедри металургії чорних металів; **О.В. Довженко**, аспірант кафедри металургії чорних металів

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, Україна

Дослідження впливу тугоплавких часток у шлаку на адгезію до вогнетриву

У статті теоретично та експериментально обґрунтовано можливість регулювання співвідношення низько- та високотемпературних фаз у кінцевому конвертерному шлаку шляхом присадки оксидів кальцію та магнію, а також вплив добавки тугоплавких частинок різних фракцій на зміну крайового кута змочування та адгезію шлаку до поверхні периклазовуглецевого вогнетриву.

Ключові слова

Футерівка, адгезія, гарнісаж, конвертер, шлак.

Summary

E.N. Sigarev, Doctor of Engineering Sciences, Head of the Department of Metallurgy of Ferrous Metals, e-mail: en_sigarev@ua.fm; **N.N. Nedbailo**, Postgraduate student at the Department of Metallurgy of Ferrous Metals; **A.A. Pokhvalityi**, Senior Lecturer at the Department of Metallurgy of Ferrous Metals; **A.V. Dovzhenko**, Postgraduate student at the Department of Metallurgy of Ferrous Metals

Dniprovsk State Technical University, Kamenskoye, Ukraine

Investigation of the effect of refractory particles in slag on adhesion to refractories

The article theoretically and experimentally substantiates the possibility of regulating the ratio of low and high temperature phases in the final converter slag by the addition of calcium and magnesium oxides, as well as the effect of adding refractory particles of different fractions on the change in the wetting angle and the adhesion of the slag to the surface of the periclase-carbon refractory.

Keywords

Lining, adhesion, garnissage, converter, slag.