

- tov sgoraniya* (Thermodynamic and transport properties of combustion). Vol. 1. Moscow: VINITI, 1972. 266 p.
2. Kulikov I.S. *Termicheskaya dissociaciya soedineniy* (Thermal dissociation of compounds). Moscow: Metallurgija, 1966. 250 p.
 3. Berdnikov V.I., Gudim Yu.A. *Izv. vuz. Chernaya metallurgiya*. 2012. № 6. Pp. 14 – 20.
 4. Trusov B.G. *Baza dannyh «Terra 2.9»* (Database «Terra 2.9»). Moscow: MG TU im. N.Je. Bauman, 2006 (jelektronnyj resurs).
 5. *Baza dannyh «HSCChemistry 5.1»* (Database «HSCChemistry 5.1»). AnttiRoine – Pori (Finland): OutokumpuResearchOy, InformationService, 2002 (jelektronnyj resurs).

Received February 28, 2013

УДК 669.184.125.046.58.001.76

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ШЛАКОВОГО ГАРНИСАЖА НА ФУТЕРОВКУ КОНВЕРТЕРОВ*

Е.В. Протопопов¹, *д.т.н., профессор*

А.Г. Чернятевич², *д.т.н., профессор*

С.В. Фейлер¹, *к.т.н., доцент*

Е.Н. Сизарев², *к.т.н., доцент*

¹ Сибирский государственный индустриальный университет (Новокузнецк, Россия)

² Днепродзержинский государственный технический университет (Днепродзержинск, Украина)

Аннотация. Представлены новые технологии и конструктивные решения фурменных устройств, обеспечивающих нанесение шлакового гарнисажа и торкрет-покрытий на футеровку конвертера.

Ключевые слова: конвертер, стойкость футеровки, раздувка шлака, шлаковый гарнисаж, гарнисажная фурма, факельное торкретирование, технология.

E-MAIL: feyler@rdtc.ru

Одним из важнейших путей повышения производительности, экономии и рационального использования материальных и энергетических ресурсов кислородно-конвертерных цехов является продление срока службы футеровки агрегатов.

В СССР основным методом повышения стойкости футеровки конвертеров являлся способ торкретирования высокотемпературным факелом, образующимся при сгорании в кислороде тонкомолотой углеродистой составляющей (25 – 30 % кокс, уголь, сланец) и подаче торкрет-массы на основе 70 – 75 % обожженных магнетита или доломита [1 – 4]. В процессе формирования факела частицы огнеупорного материала нагревались и при контакте с футеровкой спекались между собой с образованием прочного торкрет-покрытия.

Технология и оборудование факельного торкретирования футеровки конвертеров в горизонтальном и вертикальном положении, разработанные ДонНИИчерметом (г. Донецк, Украина) и Всесоюзным институтом огнеупоров (г. Санкт-Петербург, Россия) в содружестве с инженерно-техническими работниками металлургических предприятий, были внедрены практически во всех кислородно-конвертерных цехах СССР [1 – 4]. Было признано [2 – 5], что наиболее перспективным является способ факельного торкретирования механи-

зированными и высокопроизводительными установками вертикального типа с применением недефицитных торкрет-масс на основе доломита и извести.

На смену технологии факельного торкретирования в 90-х гг. прошлого столетия пришел разработанный в США [6] новый ресурсосберегающий метод продления срока службы футеровки конвертеров, основанный на нанесении шлакового гарнисажа на поверхность футеровки способом раздувки конечного шлака, который предварительно модифицирован магниезиальными материалами, струями азота. Шлаковый гарнисаж предотвращает непосредственный контакт периклазоуглеродистого огнеупора с агрессивным окислительным шлаком, формирующимся в начальный период продувки. В ходе дальнейшей продувки агрессивное воздействие шлака на огнеупорную футеровку снижается в результате повышения основности и концентрации в нем оксида магния за счет растворения добавок шлакообразующих и магниезиальных материалов, а также нанесенного в предыдущей плавке гарнисажа.

На зарубежных металлургических предприятиях благодаря используемым приемам нанесения шлакового гарнисажа и торкретирования мест локального износа периклазоуглеродистой футеровки конвертера ее стойкость доведена до 10 – 23 тыс. плавов [7]. Таких результатов в зарубежной практике добились за счет комплексного подхода к решению проблемы, когда наряду с ошлакованием и локальным торкретированием

* Работа выполнена в СибГИУ по государственному заданию Минобрнауки России, проект 2556.

футеровки были выведены на соответствующий уровень операции:

- подготовки металлолома и предварительного рафинирования чугуна перед конвертерной плавкой с удалением кремния, серы и фосфора;

- управления ходом продувки конвертерной ванны и ликвидацией додувок путем применения вспомогательной фурмы-зонда;

- снижения температуры полупродукта на выпуске из конвертера за счет дальнейшей ковшевой доводки стали на установке ковш-печь;

- контроля износа футеровки лазерными измерительными системами;

- модернизации и качественного проведения ремонтно-профилактических работ и обслуживания всех вспомогательных систем и оборудования (механического привода, систем охлаждения опорных колец и корпуса конвертера, кислородных фурм и т.д.).

Отсутствием описанного комплексного подхода к повышению стойкости футеровки конвертеров, по-видимому, можно объяснить достигнутые на сегодняшний день более скромные показатели кампании агрегатов в пределах 3 – 5 тыс. плавов на металлургических предприятиях СНГ [8, 9]. При этом все же главными факторами, обеспечивающими рост показателей стойкости футеровки конвертеров, являются применение специальных магнезиальных флюсов для формирования конечного шлака с повышенными гарнисажными свойствами, способ и конструкция фурмы для нанесения шлакового гарнисажа.

Важно отметить, что в процессе освоения проявились следующие недостатки технологии ошлакования футеровки конвертеров:

- присадка по ходу продувки магнезиальных шлакообразующих материалов с целью формирования конечного шлака сопровождается ухудшением условий дефосфорации и десульфурации расплава, развитием явления «сворачивания» шлака и развитием интенсивного выноса капель металла с заметалливанием технологического оборудования (ствола кислородной фурмы, горловины конвертера, экранных поверхностей камина);

- классическая верхняя кислородная фурма не приспособлена для эффективной раздувки шлака с направленным интенсивным брызговыносом шлаковых капель на футеровку конвертера;

- на футеровку конвертера раздувкой наносится только часть подготовленного конечного шлака, а часть сливается в шлаковую чашу, что приводит к нерациональному использованию присаживаемых дорогостоящих магнезиальных шлакообразующих материалов (известково-магнезиального флюса (ИМФ), флюса ожелезненного магнезиального (ФОМ), самораспадающихся магнезиальных гранул (СМГ), флюса магнезиального железо-углеродосодержащего (ФМБУЖ) и др. [8, 9]).

В таких условиях, по мнению авторов, перспективным является проведение горячего ремонта футеровки конвертеров по двум технологическим схемам:

- формирование в процессе продувки конвертерной ванны шлака с оптимальным (5 – 6 %) содержанием оксида магния с последующим нанесением шлакового гарнисажа на футеровку конвертера посредством раздувки азотными струями с одновременным факельным вдуванием «впрессовкой» в него порошкообразных магнезиальных материалов с целью формирования высокостойкого гарнисажного покрытия;

- раздувка конвертерного шлака азотно-порошковыми струями и формирование на футеровке высокостойкого гарнисажа в процессе намораживания брызг шлака, обогащенных порошком магнезиального материала.

При этом предусматривается, что:

- машина подачи технологических газов оснащается помимо кислородной фурмы специальной гарнисажной фурмой, обеспечивающей совмещенную раздувку шлака азотными струями и факельное торкретирование футеровки либо нанесение шлакового гарнисажа раздувкой шлака азотно-порошковыми струями, несущими во взвешенном состоянии недефицитные магнезиальные материалы;

- использование существующего в цехах оборудования для приготовления и подачи торкрет-массы через гарнисажные фурмы;

- обязательная в цикле каждой конвертерной плавки операция раздувки конечного шлака с нанесением на футеровку магнезиальных шлакообразующих материалов.

Промышленному внедрению предложенных технологических приемов предшествовал комплекс исследований [10 – 15], проведенный с использованием физического и численного моделирования. Эти исследования позволили:

- установить основные режимы раздувки шлака, в том числе режим пробоя стационарными, перемещающимися газовыми или газопорошковыми струями, формирующими обособленные или соприкасающиеся по внешним границам зоны эллипсовидной формы, с перемещением по поверхности кратеров волн и развитием направленного брызговыноса; при этом дополнительно может проводиться факельное вдувание («впрессовка») в наносимый шлаковый гарнисаж порошкообразных магнезиальных шлакообразующих материалов с помощью боковых сопел, расположенных по стволу фурмы;

- выполнить обоснование определяющих параметров дутьевого режима ошлакования футеровки конвертеров при многоструйной раздувке шлака;

- разработать методику определения основных конструктивных параметров новых конструкций торкрет-гарнисажных фурм при заданных расходах технологических газов и торкрет-массы.

Первоначально с использованием полученной информации в условиях работы кислородно-конвертерного цеха № 2 ОАО «ЕВРАЗ Западно-Сибирский ме-

таллургический комбинат» («ЕВРАЗ ЗСМК») для проведения ремонта периклазоуглеродистой футеровки 350-т конвертеров по предложенной технологии была внедрена водоохлаждаемая гарнисажная торкрет-фурма [16, 17]. В период работы такой гарнисажной торкрет-фурмы было обеспечено улучшение большинства технологических и технико-экономических показателей конвертерной плавки, достигнуто увеличение средней стойкости периклазоуглеродистой футеровки по цеху [17].

Вместе с тем были установлены и следующие отрицательные стороны конструкции водоохлаждаемой гарнисажной торкрет-фурмы и технологии горячего ремонта футеровки конвертеров с ее использованием:

- значительный вес и более сложная конструкция в сравнении с используемой штатной фурмой для факельного торкретирования, что вызывает осложнения в подъеме и установке фурмы в фурменный стенд;

- отсутствие компенсирующих устройств теплового расширения наружной трубы в наконечнике торкрет-фурмы, что может привести к разрушению сварных швов, возникновению течи охлаждающей воды и прекращению работы устройства;

- повышенные трудозатраты при изготовлении и ремонте наконечников торкрет-гарнисажной фурмы;

- локальное разрушение нанесенного шлакового гарнисажа из-за высокотемпературного воздействия торкрет-факелов на футеровку.

С целью устранения указанных недостатков и дальнейшего совершенствования технологии «горячих» ремонтов футеровки были разработаны упрощенные конструкции газоохлаждаемых торкрет-гарнисажных фурм, приспособленных как для раздувки подготовленного конечного шлака азотными и азотно-порошковыми струями с целью нанесения шлакового гарнисажа, так и одновременного или последующего факельного торкретирования футеровки; установлены возможности применения торкрет-масс на основе необоженных магнезиальных материалов с целью снижения температуры образующихся торкрет-факелов и предотвращения возможного разрушения нанесенного гарнисажного слоя.

Предварительно для условий ремонтов футеровки 350-т конвертеров ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» и 160-т конвертеров ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (Украина) путем численных расчетов были исследованы термодинамические особенности торкретирования футеровки конвертера с использованием торкрет-гарнисажной фурмы, обеспечивающей в процессе ошлакования футеровки конвертера в течение 3 – 5 минут факельное торкретирование с использованием торкрет-масс на основе сырых карбонатных магнезиальных шлакообразующих материалов [17 – 20].

Результаты расчетов показывают возможность существенной замены обожженной огнеупорной составляющей торкрет-массы пылью доломитизированного

известняка, сырого доломита и магнезита. За реальное время нахождения частицы карбоната в торкрет-факеле происходит ее диссоциация, она успевает нагреться до температуры факела.

Численными экспериментами и прямыми мерами в промышленных условиях тепловизором «NEC TH9100» установлена температура ствола гарнисажных фурм до и после операции нанесения шлакового гарнисажа на футеровку. Подтверждено [21], что газовое охлаждение фурмы, изготовленной из обычной углеродистой стали, надежно, обеспечивает высокую стойкость дутьевого устройства. Зафиксированная температура поверхности ствола гарнисажной и газопорошковой торкрет-фурмы после извлечения из конвертера достигает 500 и 350 °С соответственно.

Предложенные мероприятия по устранению недостатков применения водоохлаждаемой гарнисажной торкрет-фурмы в дальнейшем устранены в условиях работы 350-т конвертеров ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» и 160-т конвертеров ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». На основе полученных данных проведена модернизация действующих установок факельного торкретирования, разработаны и внедрены новые технологии ремонта футеровки и конструкции газоохлаждаемых торкрет-гарнисажных фурм (рис. 1). Разработанные технологии обеспечивают совместное и раздельное нанесение шлакового гарнисажа и факельное торкретирование периклазоуглеродистой футеровки при раздувке шлака азотом через торцевые сопла Лаваля с расходом 900 – 1200 и 350 – 430 м³/мин для 350-т и 160-т конвертеров соответственно. При этом осуществляется подача на стены конвертера торкрет-массы (30 % кокса + 70 % необоженного доломита) с расходом 1,5 – 2,0 и 0,5 – 0,8 т на операцию в потоке азота, обогащенного до 60 % кислородом, или сжатого воздуха с интенсивностью 350 – 400 и 60 – 80 м³/мин для 350-т и 160-т конвертеров соответственно через десять боковых цилиндрических сопел, размещенных в два однорядных по высоте яруса.

Для газопорошковой раздувки конечного шлака также разработаны [21, 22] газоохлаждаемые гарнисажные фурмы с двух- и четырехсопловым наконечником, имеющим составные сопла типа «труба в трубе» (рис. 2).

Наконечник выполнен в виде:

- двух концентрично размещенных стальных труб: внутренней для подачи порошкообразных магнезиальных материалов с расходом 350 – 600 кг/мин в потоке транспортирующего азота с максимальной интенсивностью 150 – 250 м³/мин, и наружной, обеспечивающей расход технологического азота на раздувку конечного шлака в пределах 750 – 1200 м³/мин;

- верхней тарелки с закрепленными в ней под углом 15° к вертикали газопорошковыми цилиндрическими соплами диам. 34 мм и нижней тарелки с азотными соплами Лаваля критического диам. 75 мм, выступающими за торец тарелки.

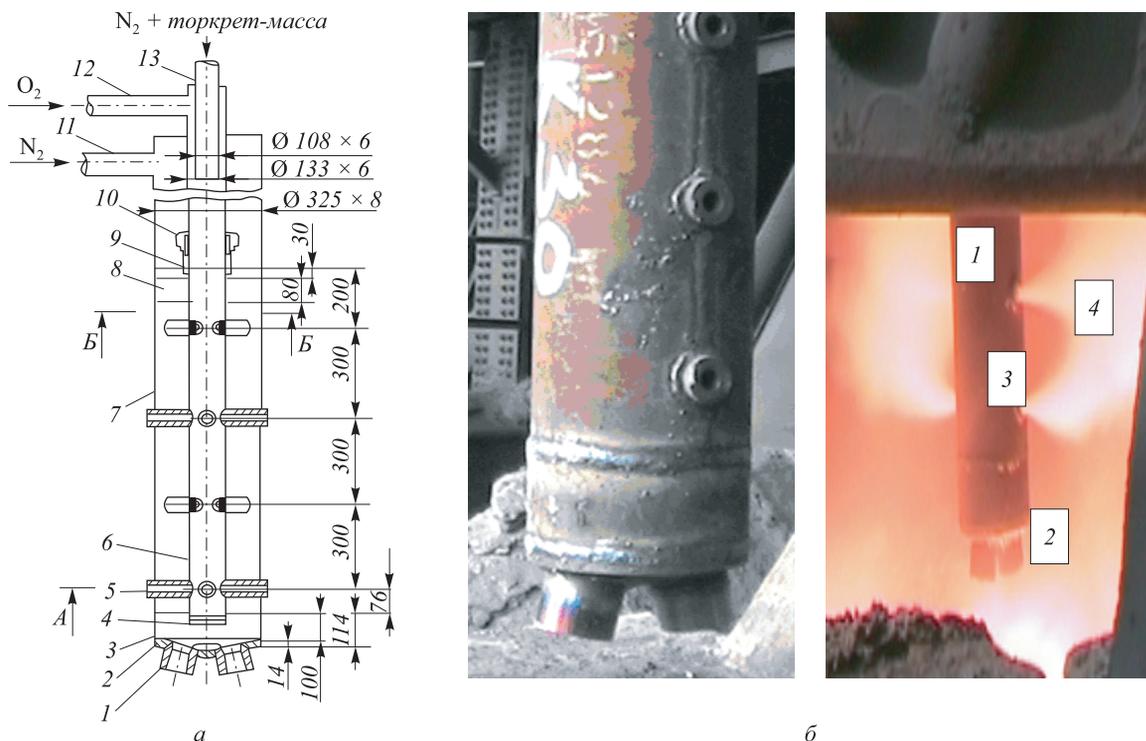


Рис. 1. Конструкция (а) и вид (б) газоохлаждаемой торкрет-гарнисажной фурмы:
 а: 1 – сопло Лавала; 2 – тарелка; 3 – торцевой наконечник; 4 – заглушка; 5 – боковое цилиндрическое сопло;
 б – внутренняя труба подачи торкрет-массы; 7 – наружная труба; 8 – фиксатор; 9 – патрубок сальникового компенсатора;
 10 – гайка компенсатора; 11 – патрубок подвода азота для раздува шлака; 12 – патрубок подвода технологического кислорода;
 13 – патрубок подвода торкрет-массы в потоке несущего азота;
 б: 1 – наконечник фурмы; 2 – сопло Лавала; 3 – боковое цилиндрическое сопло; 4 – торкрет-факел

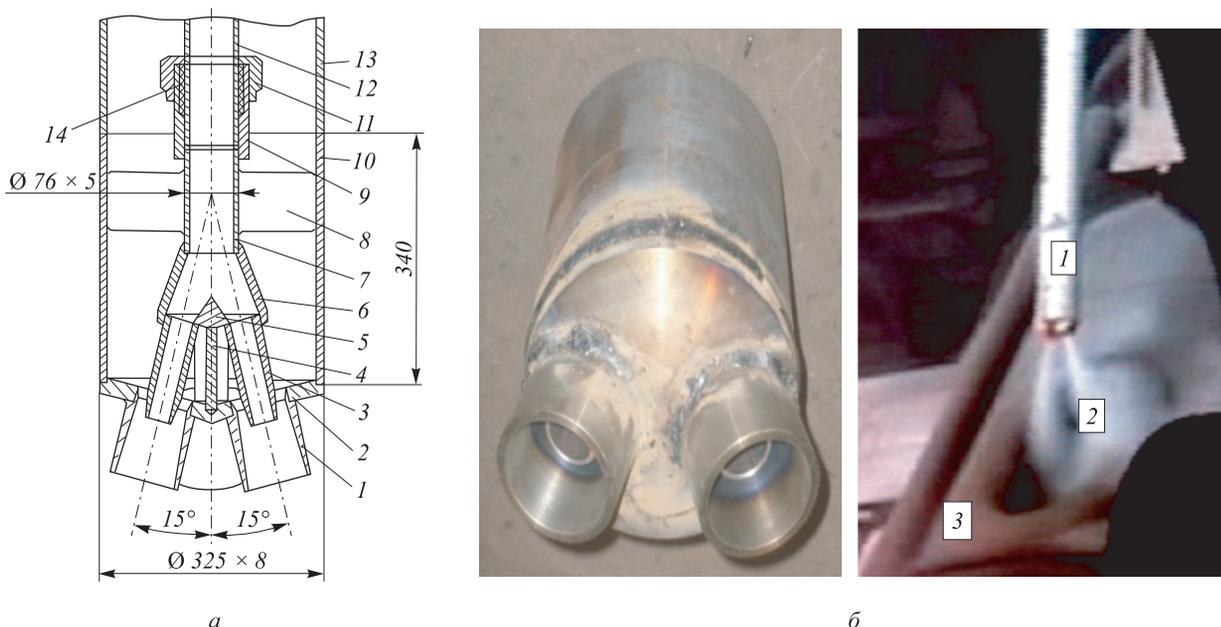


Рис. 2. Конструкция (а) и вид (б) наконечников двухсопловой газопорошковой фурмы:
 а: 1 – сопло для подачи азота; 2 – нижняя чаша; 3 – газопорошковое сопло; 4 – фиксатор; 5 – рассекатель; 6 – верхняя чаша; 7 – труба-вставка;
 8 – ребро; 9 – компенсатор; 10 – вставка; 11 – гайка; 12 – газопорошковая труба; 13 – наружная труба; 14 – сальниковое уплотнение;
 б: 1 – наконечник фурмы; 2 – газопорошковый факел; 3 – фурменное окно

Азот для раздувки шлаковой ванны подается в кольцевом зазоре между внутренней и наружной трубами, поступает к нижней тарелке и в виде четырех кольцевых сверхзвуковых азотных струй дувается в рабочее прост-

ранство конвертера по зазорам между внутренними цилиндрическими соплами и внешними соплами Лавала.

Магнезиальная торкрет-масса в потоке азота подается через внутреннюю трубу и в виде газопорош-

ковых струй вдувается в полость конвертера через цилиндрические сопла. При этом газопорошковые струи (азот + торкрет-масса) окружены кольцевой оболочкой сверхзвукового азота, которая формируется при вдувании азота через кольцевой зазор между соплами.

За счет вдувания магнезиальной торкрет-массы в потоке азота непосредственно в объем шлаковой ванны обеспечивается формирование капель шлака с необходимыми физико-химическими свойствами (химический состав, жидкоподвижность и т.п.) непосредственно в пределах реакционных зон с одновременным набрызгиванием капель шлака на футеровку.

Для вдувания предусмотрено использование недефицитных торкрет-масс, включающих продукты помола отходов обожженного и сырого доломита, боя магнетитовых огнеупоров, производство которых без особых проблем может быть налажено в действующих отделениях приготовления торкрет-масс.

Выводы. В условиях работы 350-т конвертеров ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» и 160-т конвертеров ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» отработаны новые ресурсо- и энергосберегающие технологии и конструкции гарнисажных фурм, обеспечивающие нанесение шлакового гарнисажа на футеровку конвертера путем раздувки шлака и факельного торкретирования с использованием магнезиальных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лакунцов А.В., Чемерис О.Н., Учитель Л.М. и др. // Бюл. ЦИИИ и ТЭИ ЧМ. 1977. № 22. С. 46, 47.
2. Чемерис О.Н., Лакунцов А.В., Червоненко В.М. и др. // *Металлург*. 1977. № 12. С. 25, 26.
3. Факельное торкретирование футеровки кислородных конвертеров / Е.Д. Штепа, А.А. Ярмаль, В.М. Червоненко и др. – Киев: Техніка, 1984. – 143 с.
4. Поживанов А.М., Карпов Н.Д., Рябов В.В. и др. // *Огнеупоры*. 1984. № 10. С. 7–9.
5. Малахов М.В., Чемерис О.Н., Юзефовский И.А. и др. // *Огнеупоры*. 1987. № 1. С. 50–53.
6. Messina C.I. // *Iron and Steel Engineer*. 1996. № 5. P. 17–19.

7. Sian C., Wenyuan Y., Conglie Z. // *Iron and Steelmaker*. 2000. № 7. P. 39–41.
8. Дьяченко В.Ф., Захаров И.М., Овсянников В.Г. и др. // *Новые огнеупоры*. 2006. № 6. С. 3–6.
9. Воронина О.Б., Ушаков С.Н., Захаров И.М. и др. // *Сталь*. 2009. № 10. С. 28, 29.
10. Протопопов Е.В., Айзатулов Р.С., Чернятевич А.Г. и др. // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1997. № 2. С. 5–9.
11. Протопопов Е.В., Айзатулов Р.С., Чернятевич А.Г. и др. // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1997. № 4. С. 14–17.
12. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Соколов В.В. и др. // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2004. № 10. С. 8–13.
13. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Соколов В.В., Чубина Е.А. – В кн.: *Труды восьмого конгресса сталеплавильщиков (г. Нижний Тагил, 18–22 октября 2004 г.)*. – М.: Черметинформация, 2005. С. 133–139.
14. Нугуманов Р.Ф., Протопопов Е.В., Галиуллин Т.Р. и др. // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2006. № 12. С. 7–12.
15. Галиуллин Т.Р., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. и др. // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2007. № 10. С. 15–19.
16. Пат. 2273669 РФ. Способ ремонта футеровки конвертера и фурма для его осуществления / Мокринский А.В., Протопопов Е.В., Лаврик А.Н. и др. Заявл. 06.08.2004. Опубл. 10.04.2006. Бюл. № 10.
17. Соколов В.В., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. и др. – В кн.: *Металлургия России на рубеже XXI века: сб. науч. тр. Международной науч.-практ. конф. Том. II*. – Новокузнецк, 2005. С. 293–297.
18. Сигарев Е.Н., Чернятевич А.Г., Чубина Е.А. // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2007. № 2. С. 17–24.
19. Калимуллин Р.Ф., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Жибинова И.А. // *Вестник СибГИУ*. 2013. № 3. С. 9–13.
20. Калимуллин Р.Ф., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Жибинова И.А. // *Вестник СибГИУ*. 2013. № 3. С. 4–8.
21. Чернятевич А.Г., Сигарев Е.Н., Протопопов Е.В. и др. // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2011. № 2. С. 15–20.
22. Пат. 2342444 РФ. Способ нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера / Нугуманов Р.Ф., Галиуллин Т.Р., Протопопов Е.В. и др. Заявл. 05.12.2006. Опубл. 27.12.2006. Бюл. № 36.

© 2014 г. *Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич, С.В. Фейлер, Е.Н. Сигарев*
Поступила 21 мая 2014 г.

NEW TECHNOLOGIES FOR SLAG SKULL APPLICATION ON CONVERTER LINING

E.V. Protopopov¹, Dr. Eng., Professor
A.G. Chernyatevich², Dr. Eng., Professor
S.V. Feyler¹, Ph.D., Associate Professor
E.N. Sigarev², Ph.D., Associate Professor

¹ Siberian State Industrial University (Novokuznetsk, Kemerovo region, Russia)

² Dneprodzerzhinsk State Technical University (Dneprodzerzhinsk, Ukraine)

E-MAIL: feyler@rdtc.ru

Abstract. The article presents new technologies and design solutions of tuyere devices, providing the application of slag and sprayed coatings on the converter lining.

Keywords: converter, lining life, blowing slag, slag skull, scull lance, torch gunning, technology.

REFERENCES

1. Lakuntsov A.V., Chemeris O.N., Uchitel' L.M. etc. *Byulleten' CIIN i TJeI ChM*. 1977. Vol. 22. Pp. 46, 47.
2. Chemeris O.N., Lakuntsov A.V., Chervonenko V.M. etc. *Metallurg*. 1977. Vol. 12. Pp. 25, 26.
3. Shtepa E.D., Yarmal' A.A., Chervonenko V.M. etc. *Fakel'noe torkretirovanie futerovki kislorodnyh konverterov* (Flame gunned lining of oxygen converters). Kiev: Tehnika, 1984. 143 p.
4. Pozhivanov A.M., Karpov N.D., Ryabov V.V. etc. *Ogneupory*. 1984. Vol. 10. Pp. 7–9.
5. Malahov M.V., Chemeris O.N., Yuzefovskiy I.A. etc. *Ogneupory*. 1987. Vol. 1. Pp. 50–53.

6. Messina C.I. *Iron and Steel Engineer*. 1996. Vol. 5. Pp. 17–19.
7. Sian C., Wenyuan Y., Conglie Z. *Iron and Steelmaker*. 2000. № 7. Pp. 39–41.
8. D'yachenko V.F., Zaharov I.M., Ovsyannikov V.G. etc. *Novye ognepory*. 2006. Vol. 6. Pp. 3–6.
9. Voronina O.B., Ushakov S.N., Zaharov I.M. etc. *Stal'*. 2009. Vol. 10. Pp. 28, 29.
10. Protopopov E.V., Ayzatulov R.S., Chernyatevich A.G. etc. *Izv. vuz. Chernaya metallurgiya*. 1997. Vol. 2. Pp. 5–9.
11. Protopopov E.V., Ayzatulov R.S., Chernyatevich A.G. etc. *Izv. vuz. Chernaya metallurgiya*. 1997. Vol. 4. Pp. 14–17.
12. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Sokolov V.V. etc. *Izv. vuz. Chernaya metallurgiya*. 2004. Vol. 10. Pp. 8–13.
13. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Sokolov V.V., Chubina E.A. *Trudy vos'mogo kongressa staleplavil'shnikov* (Proceedings of the eighth Congress of Steelmakers). Moscow: Chermetinformaciya, 2005. Pp. 133–139.
14. Nugumanov R.F., Protopopov E.V., Galiullin T.R. etc. *Izv. vuz. Chernaya metallurgiya*. 2006. Vol. 12. Pp. 7–12.
15. Galiullin T.R., Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. etc. *Izv. vuz. Chernaya metallurgiya*. 2007. Vol. 10. Pp. 15–19.
16. Mokrinskiy A.V., Protopopov E.V., Lavrik A.N. etc. *Sposob remonta futerovki konvertera i furma dlya ego osushhestvleniya* (The method of converter lining repair and lance for its implementation). Patent RF № 2273669 Byul. Izobreteniy № 10. 2006.
17. Sokolov V.V., Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. etc. *Metallurgiya Rossii na rubezhe XXI veka* (Russian metallurgy at the turn of the XXI century). Novokuznetsk, 2005. Pp. 293–297.
18. Sigarev E.N., Chernyatevich A.G., Chubina E.A. *Izv. vuz. Chernaya metallurgiya*. 2007. Vol. 2. Pp. 17–24.
19. Kalimullin R.F., Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Zhibinova I.A. *Vestnik SibGIU*. 2013. Vol. 3. Pp. 9–13.
20. Kalimullin R.F., Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Zhibinova I.A. *Vestnik SibGIU*. 2013. Vol. 3. Pp. 4–8.
21. Chernyatevich A.G., Sigarev E.N., Protopopov E.V. etc. *Izv. vuz. Chernaya metallurgiya*. 2011. Vol. 2. Pp. 15–20.
22. Nugumanov R.F., Galiullin T.R., Protopopov E.V. etc. *Sposob naneseniya shlakovogo garnisazha na futerovku konvertera* (The method of slag skull application on converter lining). Patent RF № 2342444. Byul. Izobreteniy № 36. 2006.

Received May 21, 2014

УДК 669.141.247.2

СВЯЗЬ СТРУКТУРЫ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ САЖИСТОГО УГЛЕРОДА*

А.М. Амдур¹, д.т.н., профессор

М. Лхамсүрэн¹, аспирант

В.В. Павлов¹, д.х.н., профессор

П. Барнасан², д.т.н., академик

¹ Уральский государственный горный университет (Екатеринбург, Россия)

² Институт химии и химической технологии АН Монголии (Улан-Батор, Монголия)

Аннотация. Экспериментально с помощью сканирующего электронного микроскопа показано, что частицы сажистого углерода, полученного по реакции Будуара, имеют сложную ажурную структуру, включающую глобулярные аморфные и графитизированные кристаллические элементы, соединенные перемычками, размеры которых находятся в нанометровом диапазоне. Следствием высокодисперсной и аморфной структуры сажистого углерода является повышение энергии Гиббса и высокая кинетическая активность.

Ключевые слова: частицы сажистого углерода, аморфная структура, энергия Гиббса, активность.

E-MAIL: engineer-ektb@rambler.ru

Сажистый углерод в металлургических процессах является химически более активным восстановителем по сравнению с другими видами твердого топлива. Он выделяется в менее горячих зонах (ниже 720 °С) металлургических агрегатов по реакции Будуара [1]



* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований и Научно-технологического Фонда Монголии.

Роль сажистого углерода особенно велика в бескоксовой металлургии. Содержание углерода в металлизированных окатышах (брикетах) должно соответствовать марке выплавляемой стали. Его регулируют, насыщая губчатое железо именно сажистым углеродом в зоне охлаждения шахтных печей. Важное преимущество сажистого углерода по сравнению с другим твердым топливом состоит в том, что он выделяется из газовой фазы и поэтому не содержит золы и других примесей обычного топлива.

Рассмотрим полученные [2] экспериментальные результаты изучения структуры сажистого углерода, кото-