

*А.Н. Смирнов, К.Н. Шарандин, А.Ю. Лизун*

Донецкий национальный технический университет

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ГАРНИСАЖНОГО ПОКРЫТИЯ НА РАБОЧИЙ СЛОЙ ФУТЕРОВКИ КОНВЕРТЕРА

Последнее десятилетие развитие конвертерного производства в Украине и России характеризуется значительным повышением стойкости футеровки конвертера. Это достигается за счет применения комбинированных сбалансированных схем, в которых учитываются особенности износа отдельных зон, в том числе подверженных повышенной эрозии, а так же выбора концепции по обслуживанию футеровки в ходе кампании [1, 2].

Технология, предполагающая нанесение на рабочий слой футеровки методом раздувки через фурму струями азота гарнисажа предварительно модифицированного конечного конвертерного шлака, является эффективным методом увеличения ресурса кислородного конвертера. Формирование гарнисажа на поверхности футеровки конвертера происходит за счет затвердевания шлаковой суспензии, полученной модификацией конечного конвертерного шлака специальными магнезиальными материалами [3]. Способ раздувки конечного шлака азотом может быть эффективно использован для ремонта всей поверхности футеровки конвертера [4].

Применение флюса универсального состава для модифицирования шлака под раздувку не представляется возможным. Это объясняется различными технологическими аспектами производства стали, в частности физическими и химическими свойствами сталеплавильных шлаков (содержание FeO, MgO, основности, вязкости, количества и т.д.). Так химический состав конечного шлака даже в условиях одного предприятия может колебаться в достаточно широких пределах.

Знание и контроль свойств шлака для определенных производственных условий являются необходимыми для целенаправленной модификации химического и фазового составов конечного конвертерного шлака с целью повышения температуры его затвердевания до уровня температуры поверхности футеровки и прогноза динамики образования гарнисажа для оптимизации временного режима процесса. Поэтому актуальной является задача совершенствования существующих и разработка новых ресурсо- и энергосберегающих технологий и материалов из недефицитного местного магнезиального сырья (либо в смеси с импортируемым) для нанесения шлакового гарнисажа, обладающего высокой стойкостью.

В задачу настоящего исследования входила разработка комплексной методики оценки процессов, со-

ровождающих нанесение шлакового гарнисажа на футеровку конвертера. Методика включала в себя холодное физическое моделирование гидрогазодинамики «набрызгивания» и высокотемпературное моделирование процессов адгезии, смачивания и тугоплавкости подготовленного шлака на огнеупорной подложке. Эти основные факторы в конечном счете и определяют качество и стойкость защитного покрытия.

Как правило, механизм раздувки шлака азотом изучается с помощью физического моделирования [4 – 8] на холодных моделях. В таких моделях используются безразмерные параметры (критерии подобия) с целью получения количественных данных о том или ином механизме или явлении с возможностью пересчета на «натурный объект».

Для экспериментальных исследований была разработана физическая модель 160-т конвертера в масштабе 1:20 (рис. 1).

Набрызгивание осуществляли как непрерывно, так и дискретно для определения массы наносимого гарнисажа. Прозрачность стенок обеспечивала возможность определения равномерности нанесения покрытия и динамики его нарастания за счет изменения плотности пропускаемого светового потока в том или ином секторе сосуда.

В качестве примера на рис. 2 представлена фотограмма динамики образования гарнисажного покрытия на внутренней поверхности футеровки конвертера физической модели.

Установлено, что нарастанию гарнисажного слоя в большей степени подвержены зоны карманов (стык нижнего конуса и цилиндра) и зоны цапф. Эти участки футеровки как правило и являются наиболее «проблемными» с точки зрения опережающего износа и трудностей в выполнении горячих ремонтов. Интенсивное нарастание верхнего конуса и горловины не наблюдается, что, по мнению авторов, так же является положительным фактором.

На рис. 3, а представлена зависимость массы нанесенного гарнисажного покрытия от высоты положения продувочной фурмы при постоянном расходе газа, на рис. 3, б показана зависимость динамики образования гарнисажного слоя (в единице времени, г/с) от объемной доли диспергированной твердой фазы в жидкости.

Обе зависимости носят экстремальный характер, т.е. имеют точки перегиба (оптимумов). В первом случае

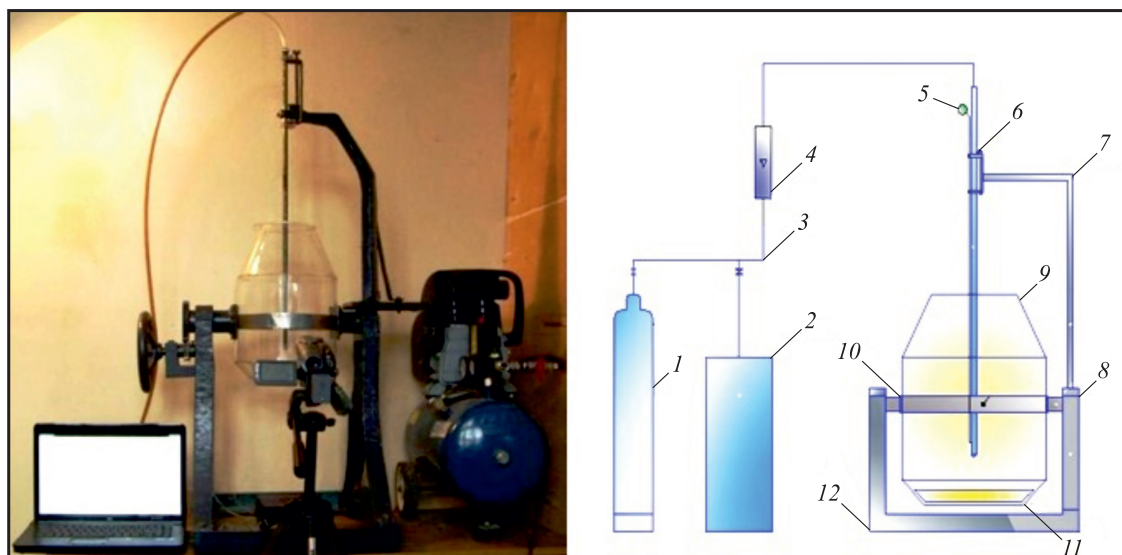


Рис. 1. Общий и схематичный вид лабораторной установки:  
1 – баллон; 2 – компрессор; 3 – трубопровод; 4 – ротаметр; 5 – манометр; 6 – фурма; 7 – опора фурмы; 8 – цапфа; 9 – сосуд;  
10 – опорное кольцо; 11 – моделирующая жидкость

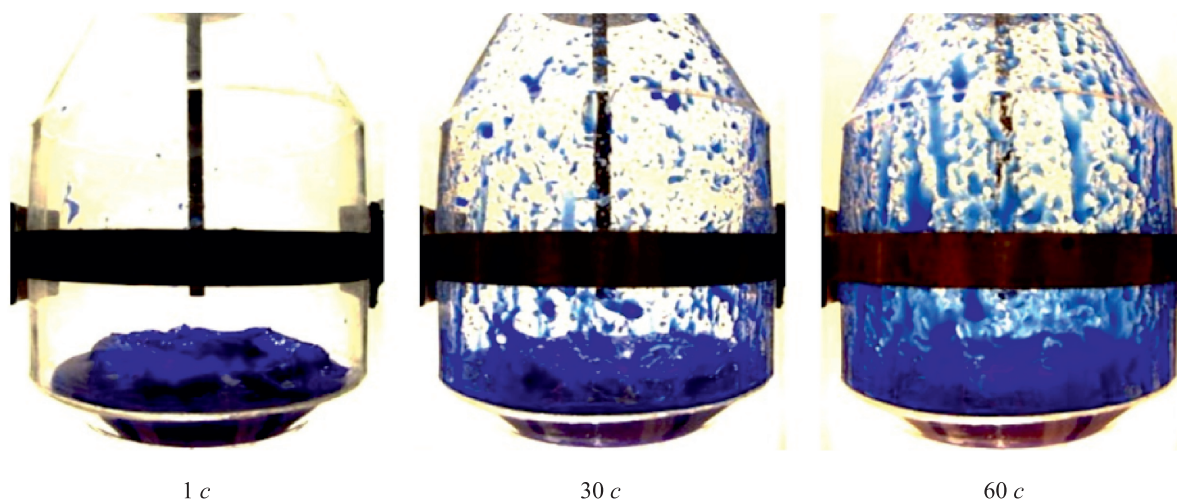


Рис. 2. Фотограмма набрызгивания шлакового гарнисажа на поверхность футеровки конвертера (физическая модель)

(рис. 3, *а*) наличие оптимума объясняется особенностями кавитации жидкости при встречных потоках продувочных струй. При этом определяющими факторами являются изменение волны по границе каверны и величина порций отрыва шлака [6, 7, 9, 10]. Во втором случае (рис. 3, *б*) при постоянном расходе и постоянной высоте положения фурмы, определяющим критерием является динамическая вязкость расплава, которая возрастает с увеличением объемной доли диспергированной твердой фазы [11]. Так, по-видимому, с ростом объемной доли (0 – 7 %) повышение вязкости способствует укрупнению порций (капель), отрывающихся от поверхности ванны, а в диапазоне (7 – 11 %) происходит резкая гетерогенизация шлака, что объясняет характер кривой.

Наряду с гидрогазодинамическими параметрами, определяющими эффективность набрызгивания (конструкция фурмы, ее высота над уровнем ванны, глубина жидкой ванны, режимы продувки и т.д.), про-

цесс формирования гарнисажного слоя сопровождается несколькими теплофизическими условиями: распределением температурного поля основной и вторичной футеровок (теплоотвод), объемной долей диспергированных твердых фаз в шлаковом расплаве, тепловым эффектом затвердевания, температурным интервалом плавления, адгезией, смачиваемостью и т.п. Особое значение так же имеет вязкость шлака и его количество.

Для проведения исследований в части оценки налипания гарнисажного покрытия в зависимости от физико-химических свойств шлака в работе предложена оригинальная методика, реализуемая в четыре этапа.

На первом этапе особое внимание уделялось подготовке образцов огнеупорных подложек, имитирующих двухстадийный износ футеровки агрегата. Для достижения сходства поверхностей огнеупорного материала модельные образцы отжигались в печи с целью освобождения поверхностного углерода и имитации

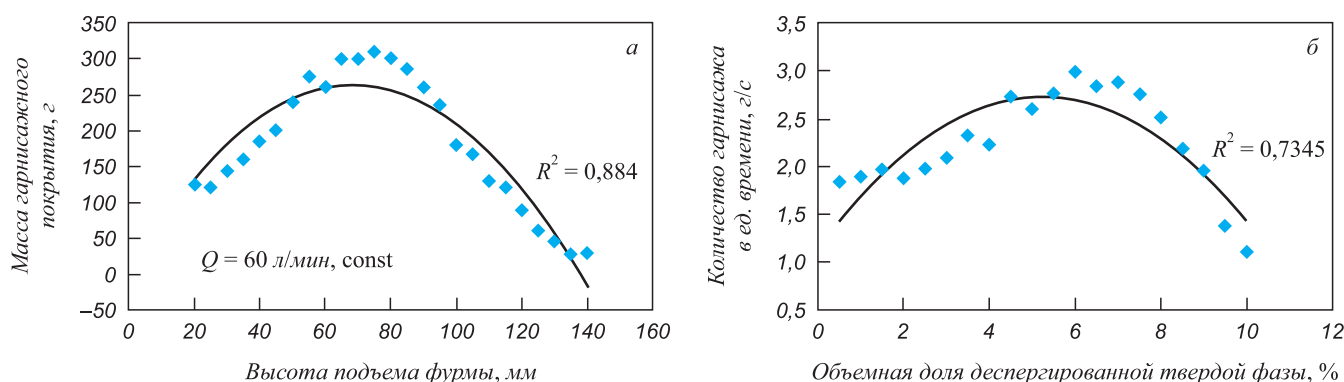


Рис. 3. Зависимость массы гарнисажа от высоты подъема фурмы (а); зависимость динамики нанесения гарнисажа от объемной доли диспергированной твердой фазы (б)

первой стадии износа. Отжиг осуществляли методом термоциклирования ( $1000 \leftrightarrow 1600 \text{ }^\circ\text{C}$ ) в течение 1 ч (2–3 термоцикла) в окислительной атмосфере. Затем подложка при температурах конвертерного процесса пропитывалась шлаком – вторая стадия износа огнеупора. В конечном счете получалась необходимая (адекватная) поверхность огнеупора, схожая с реальной, подверженной износу в процессе кампании конвертера.

На втором этапе осуществлялось непосредственное модифицирование конвертерного шлака рядом магнезиальных материалов, имеющих различный химико-минералогический состав. При этом менялось как содержание MgO в составе модификатора, так и гранулометрический состав его компонентов.

На этом этапе производились необходимые качественные и количественные замеры характерных параметров: вязкость расплава, время растворения присадок, характер взаимодействия шлака и модификатора, степень его усвоения, отбор проб для определения химического и минералогического составов.

На рис. 4 представлена экспериментальная зависимость изменения вязкости конечного конвертерного

шлака от количества диспергированной твердой фазы (нерастворенных зерен).

Показано, что с повышением количества диспергированной твердой (нерастворенной) фазы в шлаке его вязкость растет. При достижении 5–7 % зерновой фазы шлак имеет удовлетворительную вязкость для совершения операции набрызгивания. Тогда как с увеличением количества зерен до 8 % и более наблюдается резкое повышение вязкости, связанное с гетерогенизацией расплава. Такие данные хорошо коррелируются с физическим (холодным) моделированием процесса набрызгивания покрытия.

На основании выполненных исследований сформулирован концептуальный подход к физико-химическим свойствам флюсов-модификаторов, предназначенных непосредственно для наведения шлака под гарнисаж. Так, наличие в магнийсодержащих материалах труднорастворимых компонентов в количестве 0,65–0,35 % (по массе), по меньшей мере 80 % которых имеют фракцию 2–6 мм, обеспечивает доставку и равномерное распределение во всем объеме шлакового расплава уже в первые секунды продувки азотом. Это достигается за счет присутствия в материале легкорастворимой мелкодисперсной составляющей, которая способствует рассредоточению присаживаемых компонентов. Эти компоненты при контакте со шлаком быстро ассимилируются (растворяются), повышая содержание MgO в шлаке. Такое соотношение труднорастворимых и легкорастворимых составляющих приводит к образованию значительного количества тугоплавких ферритных фаз в подготавливаемом шлаке и формированию прочного скелета в остывшем гарнисажном покрытии за счет нерастворенных фракций – зерен.

С целью проверки и подтверждения разработанной концепции по модификации шлака под раздувку на третьем этапе оценивали адгезию подготовленного гарнисажа к периклазоуглеродистому огнеупору и термостойкость (тугоплавкость) остывшего покрытия.

Известно, что адгезия жидкости и твердого тела как правило достигает высоких значений вследствие полного контакта по всей площади соприкосновения. При

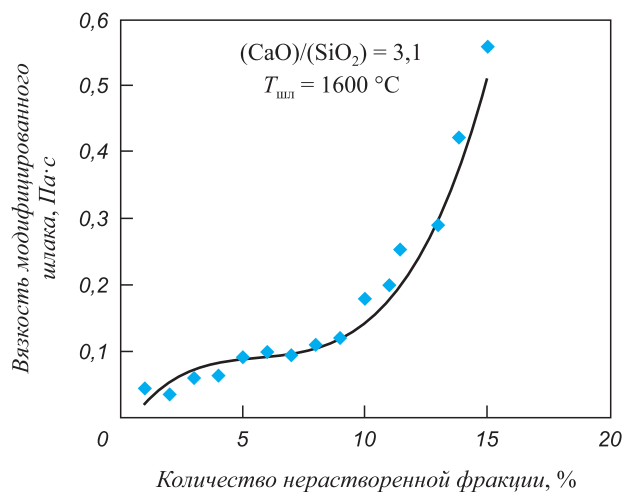


Рис. 4. Зависимость вязкости подготовленного шлака от количества нерастворенных зерен, % (по массе)

этом термин адгезия используется для определения процесса взаимодействия между клеящим материалом (шлаком) и пограничным слоем (огнеупором). На этапе первого контакта клея и подложки целесообразнее говорить о смачивании поверхности пограничного слоя клеящим материалом. Поэтому об адгезии судили по краевому углу смачивания подложки каплей шлака. Термостойкость оценивали температурным интервалом плавления гарнисажа.

Суть модельного этапа заключалась в следующем: на базе теоретических представлений о фазово-температурных превращениях шлаковых расплавов, силах и механизме смачивания разнородных веществ реализовать на практике термоустойчивый, прочный гарнисаж.

На подготовленный огнеупорный уголок, нагретый до температуры футеровки конвертера перед раздувкой ( $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , рис. 5, а) помещалась капля ( $M_k = 4 - 5\text{ г}$ ) модифицированного шлака. С помощью масштабирования фото и видео съемки данного процесса определялись краевые углы смачивания капель шлака различного химического состава.

Так, при содержании FeO более 25 %, а MgO – 6 – 7 % угол смачиваемости составляет менее  $10^{\circ}$ . При снижении содержания FeO угол смачиваемости увеличивается и при достижении содержания FeO величины 5 % приближается к  $90^{\circ}$ . Увеличение в шлаке содержания MgO вызывает ухудшение смачивания периклазоуглеродистого материала, причем степень повышения угла смачиваемости сильно зависит от окисленности шлака. При содержании FeO, равном 25 %, увеличение концентрации MgO от 6 до 16 % вызывает увеличение угла смачиваемости с  $10$  до  $25^{\circ}$ , при содержании FeO, равном 15 %, аналогичное повышение MgO приводит к изменению угла до  $90^{\circ}$ .

В совокупности с обеспечением краевого угла смачивания ( $\theta$ ), который характеризует эффективное прилипание гарнисажа к поверхности футеровки, удалось так же достичь высокой огнеупорности защитного слоя.

Принято считать, что прилипание является итогом протекания адгезии. Оно может оцениваться путем измерения усилий, требующихся для обеспечения отслаивания клея (шлака) от подложки. Во многом эта величина зависит от напряженно-деформированного состояния клевого материала и так же, в данном случае, от его термостойкости.

Для оценки температурного интервала плавления готового гарнисажного покрытия образец подложки с каплей шлака помещался в горизонтальную нагревательную печь. При этом устанавливалось горизонтальное положение уголка (рис. 5, б). По достижению заданных температур ( $1550 - 1650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) осуществляли поворот образца на угол  $90^{\circ}$ , имитируя вертикальную стенку футеровки агрегата (рис. 5, в). Посредством непрерывной фото и видео фиксации процесса, параллельно с температурой проводили оценку стойкости гарнисажа в температурном интервале конвертерной плавки.

На рис. 6 в качестве примера представлены три образца гарнисажного покрытия различного химического и гранулометрического состава с различной степенью адгезии к огнеупору и термостойкостью.

Из рис. 6 видно, что в первом случае (рис. 6, а) при достижении температур конечного периода конвертерной плавки ( $1680\text{ }^{\circ}\text{C}$  и более) образец гарнисажного покрытия не достиг точки плавления и не утратил адгезию к уголку, т.е. сползания защитного слоя не наблюдалось. Во втором случае (рис. 6, б) уже при достижении температуры  $1638\text{ }^{\circ}\text{C}$  наблюдалось незначительное

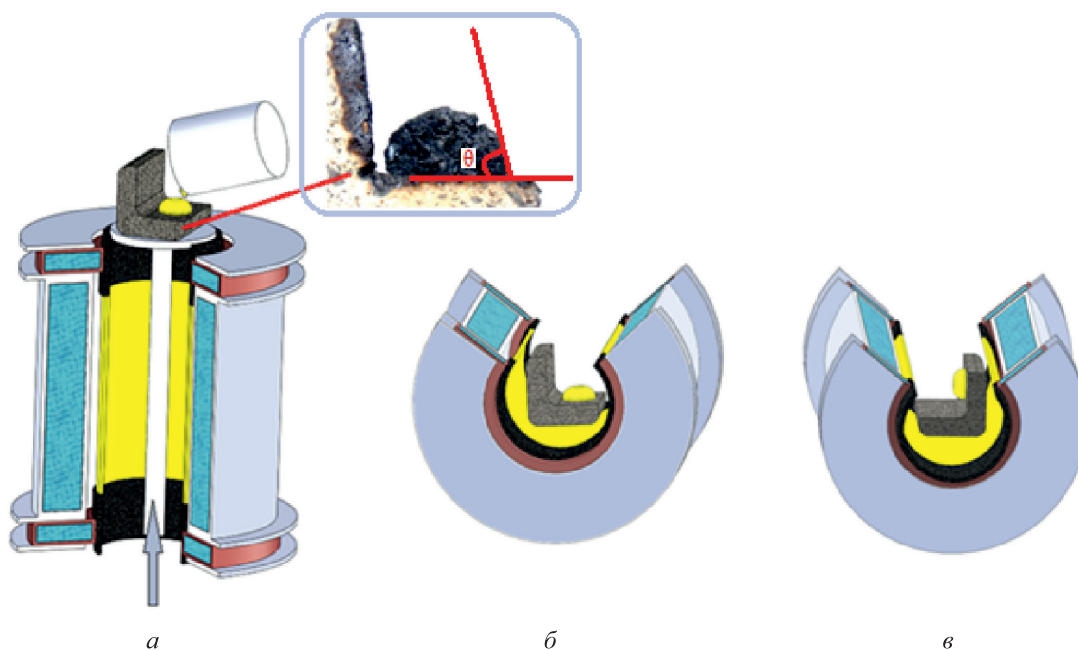


Рис. 5. Схематичное представление определения адгезии гарнисажного покрытия к огнеупорной подложке



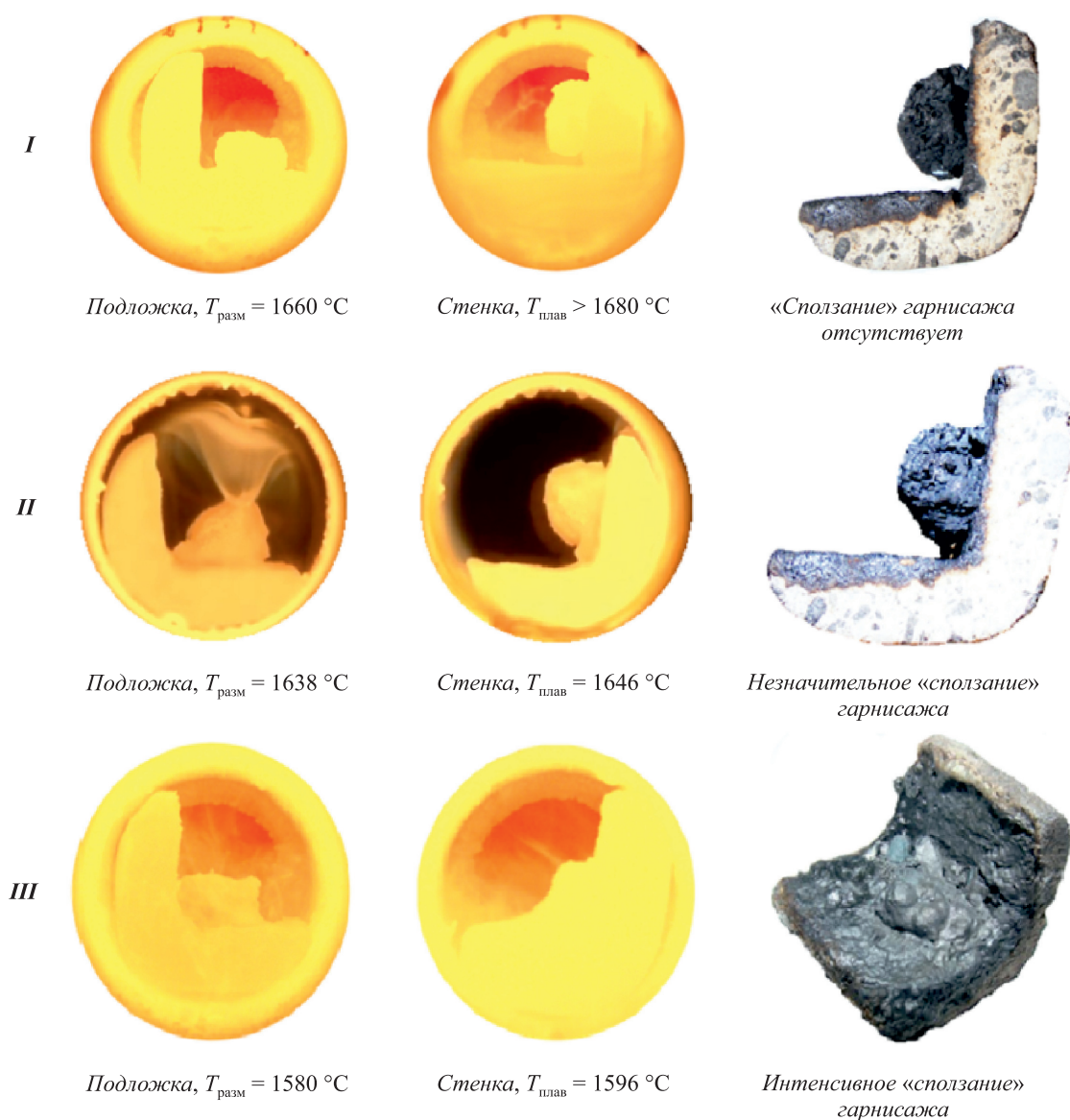


Рис. 6. Поведение гарнисажного слоя в температурном интервале плавления

поверхностное оплавление образца шлака. С повышением температуры до  $1646\text{ }^{\circ}\text{C}$  имело место незначительное сползание капли по вертикальной стенке. Неудовлетворительное поведение гарнисажа представлено на рис. 6, в. Так, в интервале  $1580 - 1596\text{ }^{\circ}\text{C}$ , образец модифицированного шлака полностью перешел в жидкую фазу и стек. Такие результаты с достаточной адекватностью могут характеризовать качество гарнисажа и дают возможность судить о качественном и количественном подборе модификатора.

На основании полученных в ходе экспериментов результатов были разработаны и испытаны в лабораторных условиях три марки флюса-модификатора магнезиального состава на основе недефицитных отечественных материалов.

**Выводы.** Предложена комплексная методика оценки процессов, сопровождающих нанесение шлакового гарнисажа на футеровку конвертера, включающая хо-

лодное и высокотемпературное физическое моделирование.

Разработана физическая модель 160-т конвертера в масштабе 1:20, позволяющая получить дополнительные данные о гидрогазодинамических аспектах технологии набрызгивания шлакового гарнисажа на поверхность футеровки агрегата.

Экспериментально установлено, что оптимального состава шлака для эффективного нанесения гарнисажа можно достичь, обеспечивая сокращение содержания FeO до уровня  $13 - 15\%$ , перенасыщение шлака MgO до  $10 - 11\%$  и внедрение в состав модификатора труднорастворимых фракций ( $2 - 6\text{ мм}$ ) в количестве  $6 - 8\%$  от массы шлака. Такие соотношения обеспечивают достаточное количество тугоплавких фаз, а наличие нерастворенных фракций (труднорастворимые компоненты) в шлаке приводит к формированию скрепляющего скелета в объеме гарнисажного покрытия. За счет этого

формируется износоустойчивый, механически прочный, обладающий высокой адгезией к поверхности огнеупоров футеровки защитный слой.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнов А.Н. // Сталь. 2006. № 10. С. 25 – 28.
2. Сердюков А.А. Тонкушин А.Ф., Смирнов А.Н. // Металлы и литье Украины 2010. № 9 – 10. С. 4 – 7.
3. Суворов С.А. Козлов В.В. // Новые огнеупоры 2011. № 1. С. 35 – 37.
4. Mills K., Su Y., Fox A., Li Z., Thackray R., Tsa H. // ISIInternational. 2005. Vol. 45. No 5. P. 619 – 633.
5. Martin M., Rendueles M. / Hydrodynamics and mass transfer in steel converters using cold models // Proceedings 5th European Oxygen Steelmaking: Int. conf., 26-28 June 2006. Aachen, Germany. – Dusseldorf: VerlagStahleisen GmbH, 2006. P. 577 – 580.
6. Garg A., Peaselee K. / Physical modeling of BOF slag splashing // Proc. 80th Steelmaking: Conf., 1997. ISS/AIME. Warrendale. PA, 1997. P. 87 – 96.
7. Matti J.L., Timo M.J. // ISIJ International. 2002. Vol. 42. No. 11. P. 1219 – 1224.
8. Mazumdar D., Evans J.W. // Boca Raton, London, New York: CRS Press, Taylor and Francis Group, 2010. P. 463.
9. Lei Z., Ming-Gang S., Shu-Mei K., Zhen-Shan Z. // Asia Steel. 2009. May 24 – 27.
10. Shiv K., Satish C. // ISIJ International. 2006. Vol. 46. No. 8. P. 1171 – 1176.
11. Суворов С.А., Козлов В.В. // Новые огнеупоры. 2011. № 1. С. 35 – 37.

© 2012 г. А.Н. Смирнов, К.Н. Шарандин, А.Ю. Лизун  
Поступила 11 сентября 2012 г.