

УДК 669.162.263

ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТА И РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ФУТЕРОВКИ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Гордон Я.М.^{1,3}, д.т.н., профессор, технический директор отдела черной металлургии (igordon@hatch.ca)

Садри А.¹, Ph.D., директор группы неразрушающего контроля (asadri@hatch.ca)

Миронов К.В.², начальник доменного цеха (Konstantin.Mironov@evraz.com)

Спирин Н.А.³, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Теплофизика и информатика в металлургии» (n.a.spirin@urfu.ru)

¹ Инженерно-консалтинговая компания «Hatch»

(2800 Speakman Dr., Mississauga, ONL5K 2R7, Canada)

² ОАО «Нижнетагильский металлургический комбинат» (ОАО «ЕВРАЗ НТМК»)

(622005, Россия, Свердловская обл., Нижний Тагил, ул. Металлургов, д. 1)

³ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. В компании Хэтч (Канада) разработана система неразрушающего контроля остаточной толщины огнеупорной кладки доменной печи и электропечей цветной металлургии и ферросплавной промышленности, в основу которой положен метод отраженного акустико-ультразвукового сигнала (AU-E). Данная система дополняет традиционное моделирование теплового состояния футеровки печи с использованием закладных термопар или по тепловой нагрузке на холодильники доменной печи и позволяет дополнительно определять положение трещин и аномалий, а также границу между гарнисажом и огнеупором. Рассмотрены ограничения и источники погрешностей в методе AU-E, представлено развитие и усовершенствование этого метода. Совершенствование метода позволило учесть влияние высоких температур, профиля печи и ее размеров, различие акустического сопротивления различных слоев многослойной огнеупорной футеровки на закономерности распространения волны. Метод AU-E является надежным и неразрушающим методом контроля состояния огнеупорной кладки плавильных печей. Аппаратное и программное обеспечение системы AU-E подверглось существенному усовершенствованию, позволившему получать результаты измерений с достаточной точностью. Оценка точности метода подтверждена физическими замерами на остановленных доменных печах. Приведены примеры использования системы диагностики состояния футеровки различными отечественными и зарубежными заводами, а также некоторые технологические мероприятия, позволяющие продлить кампанию доменной печи. Показано, что использование нескольких последовательных измерений позволяет определить скорость износа огнеупорной кладки и время вывода печи на капитальный ремонт. Метод AU-E успешно использовался (и используется) на более чем 70 доменных печах во всем мире, включая доменные печи Новолипецкого, Череповецкого, Нижнетагильского, Западно-Сибирского и Магнитогорского металлургических комбинатов, а также электропечей для выплавки ферросплавов, меди, платины и т. д.

Ключевые слова: доменная печь, футеровка, диагностика, акустико-ультразвуковой сигнал, кампания доменной печи, аномалия, козловая летка.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-603-608

Одним из факторов повышения эффективности доменной плавки является снижение себестоимости производства чугуна за счет продления кампании агрегата. Срок службы доменной печи во многом определяется техническим состоянием огнеупорной кладки горна, чрезмерный износ которой может привести к преждевременному выводу агрегата из эксплуатации. Для мониторинга состояния огнеупорной футеровки горна и принятия правильных технических решений необходимо развитие методов диагностики состояния футеровки доменных печей.

Существуют разные способы определения остаточной толщины огнеупорной футеровки доменных печей, основанные на математической обработке показаний температурных датчиков, размещенных в огнеупорной футеровке горна [1], использовании изотопов [2], применении инфракрасной термографии [3, 4], использовании ультразвуковых волн [5], анализе теплосъема с

холодильников и физических измерений. Каждый метод имеет свои достоинства и ограничения. В данной работе использован метод отраженного акустико-ультразвукового сигнала (AU-E) для определения остаточной толщины огнеупорной футеровки.

Метод отраженного акустико-ультразвукового сигнала (AU-E) был разработан в конце 90-х годов прошлого века на основе тех же принципов, на которых работает метод эхо ударного воздействия [6]. Совершенствование метода позволило учесть влияние высоких температур, профиля печи и ее размеров, различие акустического сопротивления различных слоев многослойной огнеупорной футеровки на закономерности распространения волны. Метод AU-E является запатентованной технологией, которая используется в промышленных масштабах для оценки толщины и качества огнеупоров в печах на протяжении более шестнадцати лет.

Во время измерения (рис. 1) механический удар по броне печи вызывает импульс сигнала, который распространяется в слоях огнеупоров. Волна частично отражается от границ материалов с различными свойствами, но она также проходит через слои сплошного огнеупора вплоть до границы раздела кирпич (гарнисаж)/жидкий металл. Отраженные волны сжатия (или продольные волны) воспринимаются детектором, и сигналы анализируются для оценки состояния и толщины огнеупорной футеровки.

В методе AU-E при расчете толщины используется «кажущаяся скорость волны» вместо стандартной скорости продольной волны. Кажущаяся скорость волны является средней скоростью волны в трехмерном геометрическом пространстве и учитывает влияние различных факторов, включая плотность кирпича, тепловые градиенты, форму и упругие свойства кирпича. Данные факторы учитываются с помощью двух поправочных коэффициентов α и β .

Тепловой поправочный коэффициент α для каждого слоя рассчитывается на основе динамического модуля упругости Юнга при рабочих условиях $E_d(T)$ в сравнении с динамическим модулем упругости Юнга при комнатной температуре E_0 . Тепловой поправочный коэффициент α определяется по следующему выражению:

$$\alpha = 1 + \left(\frac{\int_{t_1}^{t_2} E_d(T) dT}{E_0} \right). \quad (1)$$

В расчетах предполагается, что модуль упругости огнеупора является линейной функцией температуры между горячей t_2 и холодной t_1 поверхностями. Изменение динамического модуля упругости Юнга как функ-

ции температуры также зависит от типа рассматриваемого огнеупорного материала. Например, средние магнезиальные и глиноземистые огнеупоры больше подвержены температурным изменениям, чем средние углеродисто-графитовые огнеупоры.

Коэффициент формы β отражает снижение скорости волны, обусловленную геометрией материала, через которые проходят волны. Снижение кажущейся скорости волны происходит в связи с возбуждением собственных частот структуры под действием силы удара. Например, коэффициент β поперечного сечения колонны составляет 0,87 [6]. Для большинства печей, у которых поперечные размеры более чем в шесть раз превышают толщину футеровки, коэффициент β равен 0,96.

Уравнение для расчета толщины или глубины отражающей поверхности T с учетом введенных коэффициентов α и β для метода AU-E имеет следующий вид:

$$T = \frac{\alpha \beta V_p}{2 f_p}, \quad (2)$$

где V_p – скорость распространения продольной волны в материале; f_p – частота продольной волны.

Для многослойного участка футеровки толщина n -го слоя огнеупора (T_n) рассчитывается по следующему уравнению:

$$T_n = \frac{(V_p)_n \alpha_n \beta_n}{2} \left[\frac{1}{f} - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{2T_i}{(V_p)_i \alpha_i \beta_i} \right], \quad (3),$$

где f – резонансная частота для толщины n -го слоя.

Уравнение (3) можно использовать для определения толщины слоя футеровки на горячей поверхности (граница с жидким металлом), если известны V_{pi} , α_i , β_i

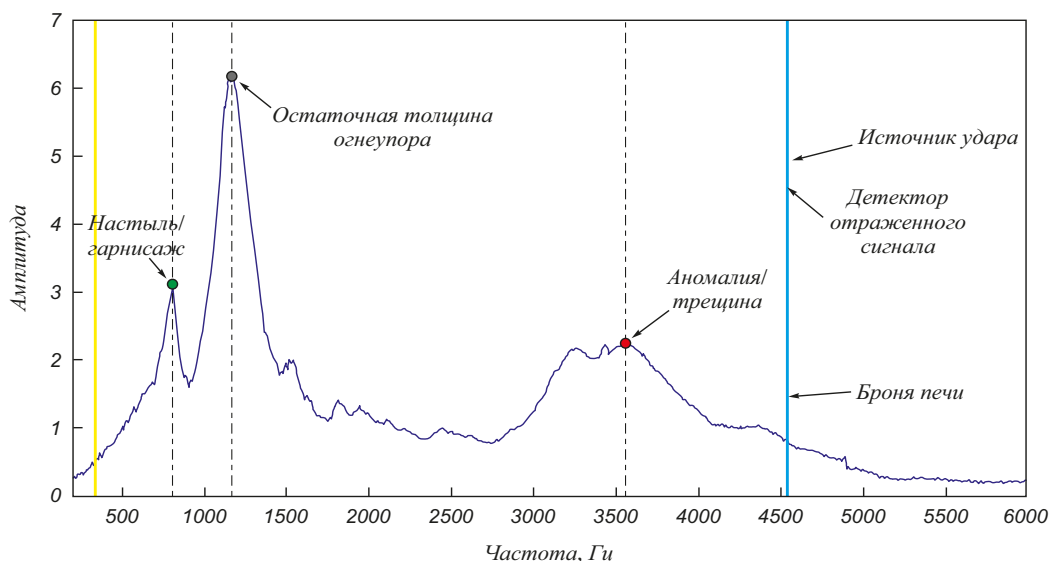


Рис. 1. Принцип метода AU-E (отраженный сигнал в частотной области)

Fig. 1. Principle of AU-E method (echo wave in frequency domain)

и толщина T_i слоев перед слоем у горячей поверхности. При этом предполагается, что волны генерируются источником контролируемых ударов и содержат достаточно энергии для того, чтобы проникнуть на значительную глубину вплоть до границы с жидким расплавом или твердой шихтой и так резонировать туда-обратно между горячей и холодной поверхностями для создания определенной частоты продольной волны.

Для аппаратурной реализации данного метода разработан широкополосный детектор вертикальных перемещений с достаточным диапазоном частот с возможностью функционировать при высоких температурах и во влажной среде. Генерация волн осуществляется ударным источником со специфическим сферическим наконечником, способным генерировать конкретный диапазон частот. Система сбора и обработки данных разработана на базе компьютерной техники, выполненной в пылевлагонепроницаемом исполнении, выдерживающей температуры в диапазоне от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Перед началом измерений на доменной печи определяется кажущаяся скорость продольной волны путем калибровки представительных проб кирпичей при комнатной температуре. Калибровочное измерение скорости волны проводится на всех материалах, через которые проходит волна. Коэффициент α определяется или опытным путем, нагревая образцы огнеупоров и измеряя скорости волны при требуемой температуре, или рассчитывается по упругим и тепловым свойствам конкретного огнеупора, известным по паспортным данным. Коэффициент β рассчитывается по размерам проверяемой зоны.

На действующих доменных печах измеренные данные во времени (временная область) являются чрезвычайно сложными, содержащими многочисленные частоты и многократные отражения, дифракции, преломления от объемных и поверхностных волн. В частотной области (см. рис. 1) результаты определяются корректнее, но все равно имеется много различных элементов, которые могут привести к неверному толкованию результатов измерений.

Рис. 1 иллюстрирует типичный сигнал АУ-Е в частотной области. Согласно уравнению (3), наиболее низкая частота отраженных волн соответствует большему расстоянию до поверхности отражения сигнала. В соответствии с этим, наименьшая частота и средняя амплитуда принадлежат границе гарнисаж–металл, вторая по величине частота и максимальная амплитуда принадлежат границе гарнисажа с огнеупором и наибольшая частота и наименьшая амплитуда характеризуют трещины или аномалию.

Износ огнеупорной футеровки обычно рассматривается как уменьшение толщины футеровки во времени, обусловленное действием комплекса тепловых, физико-химических, механических воздействий.

При использовании метода АУ-Е имеются несколько других состояний огнеупоров (аномалии), которые

могут ошибочно приниматься как остаточная толщина огнеупорной футеровки, а именно: пропитанный металлическим расплавом огнеупор, наличие гарнисажа (см. рис. 1). Когда огнеупор пропитан металлическим расплавом, у пропитанной части заметно снижаются свойства упругости по сравнению с качественным огнеупором. В результате сигналы АУ-Е будут отражаться от границы пропитки, которые можно ошибочно принять за остаточную толщину огнеупорной футеровки.

Выявление аномалий. В методе АУ-Е аномалия определяется как четкое отражение сигнала из огнеупорной футеровки, но источник отражения неизвестен. Аномалиями могут быть трещины, пустоты, проникновение металла, окисление углерода или сочетание всех этих особенностей. При наличии нарушений сплошности, трещин или границ между материалами сигналы имеют тенденцию показывать множественные отражения при более высоких частотах по сравнению с отражением от полной толщины огнеупорной кладки при низких частотах. Знание расположения любых потенциальных трещин имеет важное значение для разработки мер по борьбе с ними, поскольку трещины, которые укрупняются и распространяются, могут привести к проникновению металла в трещину или отслоению огнеупора и фактическому уменьшению толщины огнеупорной кладки.

При наличии значительных разрывов/трещин в огнеупорной футеровке сигналы от удара могут не пройти через всю толщину кирпича. Разрывы будут вызывать затухание этих сигналов и, таким образом, будет казаться, что сигналы отражаются от более тонкой зоны вблизи от нерабочей (холодной) поверхности. Таким образом, фактическая остаточная толщина огнеупорной футеровки может оказаться толще, чем обнаруженная сигналами.

Скорость продольной волны намного ниже в гидратированных, науглероженных или окисленных огнеупорах по сравнению с неповрежденными огнеупорами. Если площадь химического изменения меньше относительно длины и геометрии кладки, сигналы АУ-Е могут не подвергнуться влиянию и, следовательно, изменение качества огнеупора может быть не обнаружено. С другой стороны, если химическое воздействие обширно с точки зрения геометрии и свойств материала относительно футеровки, сигналы АУ-Е без труда обнаружат измененные участки. АУ-Е не может выявить проникновение металла в футеровку горна, если проникновение «меньше половины длины волны сигнала», которая составляет около 50 мм. В этом случае дополнительная толщина проникшего металла определяется как часть футеровки.

Пример измерения остаточной толщины футеровки. Для обследования методом АУ-Е доменная печь разбивается на ряд вертикальных сечений по окружности, которые обычно проходят через центр холодильников одного из рядов охлаждения вертикальных стенок горна

печи. Для фурменной зоны разбивка на вертикальные сечения привязана к нумерации фурм. В каждом вертикальном сечении через промежуток примерно 30 см производятся замеры по высоте печи. Пример таких замеров для доменной печи № 6 Нижнетагильского металлургического комбината (НТМК) [7, 8] приведен на рис. 2, а особенности технологии титано-магнетитовой плавки показаны в работах [9 – 12]. Сплошная линия на этом рисунке характеризует толщину футеровки по результатам замеров ноября 2015 г., в то время как пунктирная линия характеризует замеры февраля 2015 г. Точки представляют собой положение трещин/аномалий, а треугольники – толщину гарнисажа.

Результаты трех последовательных обследований ДП № 6 НТМК, проведенных в апреле 2014 г., феврале и ноябре 2015 г., позволили построить кривую степени износа: степень износа огнеупорной футеровки как для усредненных величин [7, 8], так и для ее критической точки (наименьшей) толщины футеровки (рис. 3).

Тенденция износа послужила основой для определения скорости износа футеровки доменной печи:

- средняя скорость по результатам всех измерений в горне была оценена в 6,9 мм/месяц;
- для наиболее изношенного вертикального сечения L30 средняя скорость износа футеровки составила 8,9 мм/месяц (см. рис. 3);
- существует большая вероятность, что аномалии/трещины образовали так называемый вертикальный цилиндрический стакан с наименьшим расстоянием от поверхности огнеупора 170 мм (линия L30) и наименьшим расстоянием до холодной поверхности огнеупора – 140 мм. Если чугун попадет в данную вертикальную цилиндрическую трещину, печь должна будет

немедленно остановлена на ремонт, так как остаточная толщина футеровки составит 140 мм;

– с учетом скорости износа футеровки в диапазоне 6,9 – 8,9 мм/месяц НТМК и компания Хатч пришли к выводу, что остаточная кампания ДП № 6 составляет 22 – 23 месяца, после чего печь должна быть остановлена и выведена на капитальный ремонт;

– основываясь на вышеизложенных результатах АУ-Е, а также экономическом обосновании капитального ремонта первого разряда, НТМК приняло решение о строительстве новой ДП № 7 и выводе в резерв ДП № 6 в конце 2017 г.

Выпуск «козлового чугуна». Метод АУ-Е также способен определить место для сверления «козловой летки». «Козел» выпускается из точки основания металлоприемника, которая является самым низким уровнем лещади печи. Для выпуска козлового чугуна требуется высокая степень точности. Традиционно местонахождение козловой летки определяется по показаниям термопар и бурением в нескольких местах. Однако эти методы, как правило, не точны и приводят к потере производства. Компания Хатч разработала следующую методологию определения положения козловой летки методом АУ-Е.

На основании показаний термопар и рекомендаций персонала доменной печи определяется предполагаемое расположение наиболее низкой точки лещади. Через эту точку проводится вертикаль, вдоль которой вверх и вниз от предполагаемого положения козловой летки проводятся замеры через короткие промежутки, приблизительно около 5 см. Таким образом, определяется самая нижняя точка разгара лещади и положения козловой летки. Справа и слева добавляются две вертикали примерно на расстоянии 20 см от центральной вертикали, вдоль которых также производятся измере-

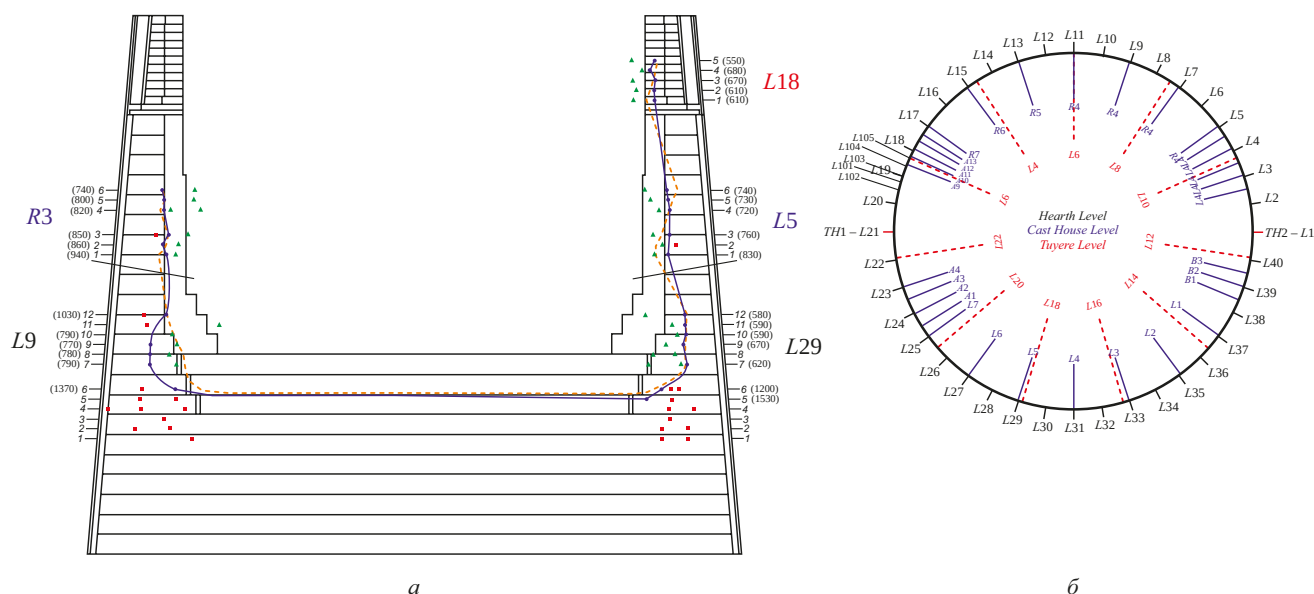


Рис. 2. Результаты оценки остаточной толщины футеровки на примере ДП № 6 НТМК

Fig. 2. Remaining refractory thickness estimate – BF 6 NTK example

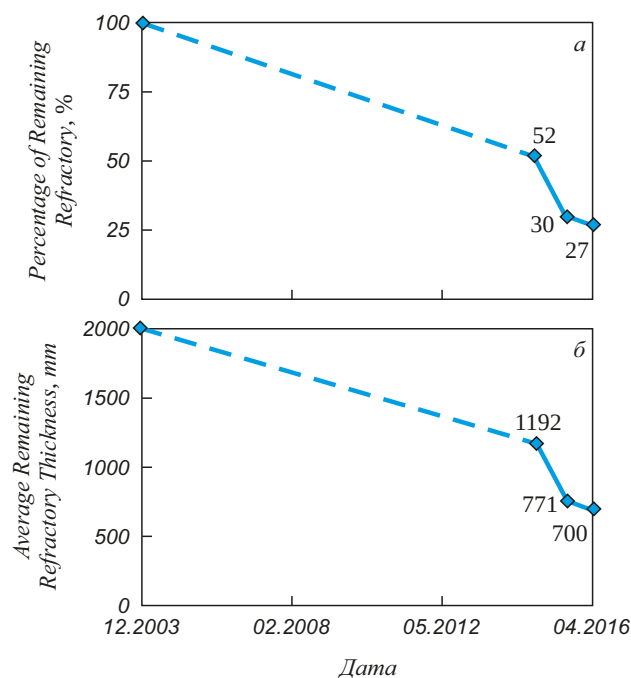


Рис. 3. Тенденция износа футеровки для вертикального сечения L30 с наиболее изношенной точкой (усредненный результат всех измерений вдоль линии L30)

Fig. 3. Tendency of refractory wear for vertical cross-section line L30 with the most worn-out point (average for all measurements along line L30)

ния для подтверждения точности определения положения козловой летки. Использование данной методологии на ряде зарубежных доменных печей показало, что метод АУ-Е точно определяет положение козловой летки в работающих доменных печах.

Определение положения козловой летки в России было выполнено для ДП № 1 Западно-Сибирского металлургического комбината. Отличные результаты выпуска козлового чугуна еще раз подтвердили надежность метода АУ-Е.

Точность измерений метода АУ-Е. В работе [13] проанализированы причины погрешностей метода АУ-Е. На основании многочисленных проверок оказалось, что точность измерений метода АУ-Е составляет 4 – 7 % фактической толщины огнеупорной кладки или положения аномалий. Точность измерения толщины настыва находится в пределах 15 % физических измерений из-за большей неопределенности в скорости волны в настыва. Точность измерений методом АУ-Е подтверждена результатами керновых бурений на работающих доменных печах и непосредственными замерах на остановленных и охлажденных доменных печах как в России [14, 15], так и за рубежом [16].

Выводы. Метод АУ-Е является надежным и неразрушающим методом контроля состояния огнеупорной кладки плавильных печей. Аппаратное и программное обеспечение системы АУ-Е подверглось существенному усовершенствованию, позволившему получать результаты измерений с достаточной точностью.

АУ-Е метод применен и продолжает использоваться на более чем 70 доменных печах по всему миру. В России метод системно используется на 16 доменных печах Новолипецкого [14, 15], Череповецкого [17], Нижнетагильского [7, 8], Западно-Сибирского и Магнитогорского металлургических комбинатов.

По мере старения печи и приближения ее к концу кампании, как правило, требуются более частые обследования футеровки горна. Это могут быть полугодовые или даже ежеквартальные обследования, которые позволяют осуществлять диагностику состояния футеровки и применять эффективные меры по ее защите для продления кампании доменных печей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Preuer A. etc. Computation of the erosion in the hearth of a blast furnace // *Steel Research*. 1992. Vol. 63. P. 147 – 151.
2. Salgado J., Oliveira C., Moutinho A., Silvério C. Control of refractory lining wear by using radioisotopes // *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes*. 1988. Vol. 39. Issue 12. P. 1265 – 1267.
3. Bolf N. Application of infrared thermography in chemical engineering // *Journal of Chemists and Chemical Engineers*. 2004. Vol. 53(12). P. 549 – 555.
4. Maldague X. Introduction to NDT by active infrared thermography // *Materials Evaluation*. 2002. Vol. 6(9). P. 1060 – 1073.
5. Parker R.L. etc. Application of pulse-echo ultrasonics to locate the solid/liquid interface during solidification and melting of steel and other metals // *Journal of Applied Physics*. 1985. Vol. 58 (11). P. 4150 – 4164.
6. Sansalone M.J., Streett W.B. *Impact-Echo: Non-destructive Evaluation of Concrete and Masonry*. Ithaca, NY: Bullbrier Press, 1997. – 339 p.
7. Kushnarev V., Mironov K., Gordon Y. etc. Careful control of refractory lining conditions at NTMK-Evraz ensures intensive operation and long campaign of titania blast furnace // *AISTech 2017 Proceedings, Nashville, May 8 – May11, USA (in printing)*.
8. Kushnarev V., Mironov K., Gordon Y. etc. AU-E control of blast furnace refractory lining at NTMK-Evraz ensures intensive operation and prediction of the end of campaign of titania blast furnace // *ESTAD 2017 Proceedings, Vienna, June 26 – 29 (in printing)*.
9. Конверторный передел ванадиевого чугуна / Л.А. Смирнов, Ю.А. Дерябин, С.К. Носов и др. – Екатеринбург: Средне-уральское книжное изд-во, 2000. – 528 с.
10. Смирнов Л.А., Дерябин Ю.А., Шаврин С.В. Металлургическая переработка ванадийсодержащих титаномагнетитов. – Челябинск: Металлургия, 1990. – 256 с.
11. Filatov S.V., Kirichkov A.A., Mikhalev V.A., Zagainov S.A. Smelting low silica hot metal at OAO NTMK // *Steel in Translation*. 2010. Vol. 40. No. 5. P. 443 – 445.
12. Носов С.К., Леонтьев Л.И., Ильин В.И. и др. Марганец важный элемент технологии при переработке титаномагнетитов по металлургической схеме // *Сталь*. 2003. № 3. С. 14 – 18.
13. Sadri A. An introduction to stress wave non-destructive testing and evaluation (NDT&E) of metallurgical furnaces and refractory condition monitoring // *CINDE Journal*. 2008. Vol. 29(2). P. 7 – 11.
14. Filatov S., Kurunov I., Gordon Y., Sadri A., Ying W. Careful control of refractory lining conditions ensures intensive operation and long campaign of blast furnace // *AISTech Proceedings, Pittsburgh, USA*. 2016. P. 695 – 704.
15. Филатов С.В., Курунов И.Ф., Гордон Я.М. и др. Продление кампании доменной печи при ее интенсивной работе // *Металлург*. 2016. № 9. С. 17 – 22.
16. Sadri A., Gebiski P., Rampersad A. etc. Comparing the accuracy of acousto ultrasonic-echo (NDT), finite element analysis (FEA), and

drilling when obtaining a blast furnace refractory lining wear profile // *Journal of Iron & Steel Technology*. 2010. No. 3. P. 1 – 12.

17. Vinogradov E.N., Karimov M.M., Dmitriev A.A. etc. Careful control of refractory lining conditions ensures prolonged campaign

of blast furnace // *ECIC 2016 Proceedings, Linz, September 12-14. 2016. P. 255 – 264.*

Поступила 12 апреля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. No. 8, pp. 603–608.

EXPERIENCE AND DEVELOPMENT OF METHODS TO ESTIMATE BLAST FURNACE REFRACTORY LINING CONDITIONS

Ya.M. Gordon^{1,3}, A. Sadri¹, K.V. Mironov², N.A. Spirin³

¹ Hatch Ltd., Mississauga, Canada

² JSC “Nizhny Tagil Iron and Steel Works”, Nizhny Tagil, Sverdlovsk Region, Russia

³ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Acousto – Ultrasonic – Echo (AU-E) method of non-destructive testing of refractory lining conditions is developed by Hatch (Canada) to estimate refractory wear of blast furnaces and electrical smelters in non-ferrous and ferro-alloys industries. This system complements the traditional modeling of heat transfer of blast furnace lining based on imbedded thermocouples data and additionally allows to determine location of cracks/anomalies and boundary between refractory lining and accretion. The limitations and accuracy of AU-E method are discussed and confirmed by comparison with physical measurements on cold furnaces. Improvement of the method allowed to take into account the influence of high temperatures, profile of the furnace and its dimensions and difference in the acoustic resistance of various layers of multilayer refractory lining on the regularity of wave propagation. The AU-E method is a reliable and non-destructive method for controlling the state of refractory masonry of smelting furnaces. The hardware and software of the AU-E system underwent a significant improvement, which made it possible to obtain measurement results with sufficient accuracy. Examples of AU-E method application to numerous furnaces in Russian Federation and around the Globe as well as some technological measures to prolong blast furnace campaign are presented and discussed. It was shown that results of several consecutive measurements allow estimation of the rate of refractory wear and prediction of the end point of blast furnace campaign. AU-E method is successfully applied for more than 70 blast furnaces around the World including blast furnaces of NLMK, Chermk, NTMK, ZapSib and MMK in Russian Federation and also for numerous copper, platinum, nickel and ferro-alloy smelters etc.

Keywords: blast furnace, refractory lining, acoustic, ultrasound, non-destructive, diagnostics, campaign.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-603-608

REFERENCES

1. Preuer A. etc. Computation of the erosion in the hearth of a blast furnace. *Steel Research*. 1992, vol. 63, pp. 147–151.
2. Salgado J., Oliveira C., Moutinho A., Silvério C. Control of refractory lining wear by using radioisotopes. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes*. 1988, vol. 39, Issue 12, pp. 1265–1267.
3. Bolf N. Application of infrared thermography in chemical engineering. *Journal of Chemists and Chemical Engineers*. 2004, vol. 53(12), pp. 549–555.
4. Maldaque X. Introduction to NDT by active infrared thermography. *Materials Evaluation*. 2002, vol. 6(9), pp. 1060–1073.
5. Parker R.L. et al. Application of pulse-echo ultrasonics to locate the solid/liquid interface during solidification and melting of steel and other metals. *Journal of Applied Physics*. 1985, vol. 58 (11), pp. 4150–4164.

6. Sansalone M.J., Streett W.B. *Impact-Echo: Non-destructive Evaluation of Concrete and Masonry*. Ithaca, NY: Bullbrier Press, 1997, 339 p.
7. Kushnarev V., Mironov K., Gordon Y., Sadri A., Ying W., Zagainov S.A. Careful Control of Refractory Lining Conditions at NTMK-EVRAZ Ensures Intensive Operation and Long Campaign of Titania Blast Furnace. *AISTech 2017 Proceedings, Nashville, May 8 – May, USA* (in printing).
8. Kushnarev V., Mironov K., Gordon Y., Sadri A., Ying W., Zagainov S.A. AU-E control of blast furnace refractory lining at NTMK-Evraz ensures intensive operation and prediction of the end of campaign of titania blast furnace. *ESTAD 2017 Proceedings, Vienna, June 26-29* (in printing).
9. Nosov S.K., Kuzovkov A.Ya., Il'in V.I. *Konvertorny peredel vana-dievogo chuguna* [BOF processing of vanadium hot metal]. Ekaterinburg: Sredn.-Ural. Kn. Izd-vo, 2000, 528 p. (In Russ.).
10. Smirnov L.A., Deryabin Yu.A., Shavrin C.B. *Metallurgicheskaya pererabotka vanadiisoderzhashchikh titanomagnetitov* [Metallurgical treatment of vanadium containing titanium-magnetite]. Moscow: Metallurgiya, 1990, 256 p. (In Russ.).
11. Filatov S.V., Kirichkov A.A., Mikhalev V.A., Zagainov S.A. Smelting low silica hot metal at OAO NTMK. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 5, pp. 443–445.
12. Nosov S.K., Leont'ev L.I., Il'in V.I., Filippov V.V., Shavrin S.V. Manganese in technology for processing the titanomagnetite. *Stal'*. 2003, no. 3, pp. 14–18. (In Russ.).
13. Sadri A. An introduction to stress wave non-destructive testing and evaluation (NDT&E) of metallurgical furnaces and refractory condition monitoring. *CINDE Journal*. 2008, vol. 29(2), pp. 7–11.
14. Filatov S., Kurunov I., Gordon Y., Sadri A., Ying W. Careful control of refractory lining conditions ensures intensive operation and long campaign of blast furnace. *AISTech Proceedings, Pittsburgh, USA, 2016*, pp. 695–704.
15. Filatov S.V., Kurunov I.F., Gordon Ya.M., Tikhonov D.N., Grachev S.N. Extending the campaign life of an intensively operating blast furnace. *Metallurgist*. 2017, no. 1, pp. 1–7.
16. Sadri A., Gebiski P., Rampersad A. etc. Comparing the Accuracy of Acousto Ultrasonic-Echo (NDT), Finite Element Analysis (FEA), and Drilling When Obtaining a Blast Furnace Refractory Lining Wear Profile. *Journal of Iron & Steel Technology*. 2010, no. 3, pp. 1–12.
17. Vinogradov E.N., Karimov M.M., Dmitriev A.A., Sokolov A.N., Kosenkov Y.V., Gordon Y., Sadri A., Ying W. Careful control of refractory lining conditions ensures prolonged campaign of blast furnace. *ECIC 2016 Proceedings, Linz, September 12-14. 2016*, pp. 255–264.

Information about the authors:

Ya.M. Gordon, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Technical Director of Iron-making technology (igordon@hatch.ca)

A. Sadri, Ph.D., Director of Non-destructive Testing Group (asadri@hatch.ca)

K.V. Mironov, Chief of Blast-Furnace Shop (Konstantin.Mironov@evraz.com)

N.A. Spirin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (n.a.spirin@urfu.ru)

Received April 12, 2017