

М. О. Золотых, А. Н. Дмитриев, О. Ю. Иванов, Ю. А. Чесноков
УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург
max@zolotyh.su

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАЗГАРА ФУТЕРОВКИ ГОРНА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ И ВНЕДРЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭТОЙ МОДЕЛИ

Для диагностики состояния футеровки горна доменной печи в течение ее кампании широко применяются методы, основанные на анализе температурных характеристик кладки. Измерение температурных характеристик производится при помощи нескольких сотен термопар, размещенных внутри огнеупоров. Особенностью рассматриваемой модели является полностью трехмерная оценка состояния кладки, наличие механизмов адаптации к фактической теплопроводности огнеупоров и оптимизация вычислений для работы в режиме реального времени.

Ключевые слова: доменная печь, горн, футеровка, диагностика, термопары, адаптация, быстроедействие.

To diagnose the condition of the lining of the hearth of the blast furnace during her campaign widely used methods based on the analysis of the temperature characteristics of masonry. Measurement of temperature characteristics is performed by means of a few hundred thermocouples placed inside the refractories. The peculiarity of this model is fully three-dimensional assessment of masonry, mechanisms of adaptation to the actual thermal conductivity of refractories and optimization calculations to work in real-time.

Keywords: blast furnace, a furnace lining, diagnosis, thermocouple, adaptation, performance.

В мире на сегодняшний день железорудное сырье перерабатывается преимущественно по схеме «доменная печь – конвертер»: в 2012 году таким образом произведено 1100 миллионов тонн чугуна и 1547,8 миллиона тонн стали. В это же время способами прямого получения по схеме DRI («металлизация – электроплавка») произведено всего 54,973 млн т стали (в том числе по технологиям Midrex – 60 %, HYL – 17 % и SL/RN – 22 %). Таким образом, на доменное производство приходится более 95 % производимой стали. При этом наибольшее число доменных печей находится в Китае (более 300 печей объемом свыше 1000 м³), второе место принадлежит Японии, а третье – России [1].

Предприятия, производящие сталь, находятся в условиях жесткой конкуренции. В этой связи важную роль играет снижение себестоимости производства металла. При производстве доменно-конверторным спосо-

бом ощутимый вклад в формирование себестоимости передельного чугуна вносит строительство самой доменной печи [2]. Таким образом ее длительная эксплуатация позволяет снижать себестоимость продукции, тем самым увеличивать прибыль и повышать конкурентоспособность металлургического предприятия. Срок службы доменной печи в большинстве случаев определяется сроком службы кладки металлоприемника.

Для диагностики состояния кладки горна используются различные методы: акустические исследования, отбор кернов, введение радиоактивных изотопов и анализ температурных характеристик. Последние методы контроля являются наиболее перспективными: основным их достоинством является возможность организации мониторинга кладки в реальном времени, без использования дорогостоящего и сложного оборудования и без нарушения прочности самой кладки. Кроме того, ввиду непрерывности процесса диагностики, температурные способы хорошо подходят для информационного обеспечения процесса наращивания и поддержания защитного гарнисажа.

Нами была разработана математическая модель, основанная на численном решении уравнения Фурье [3]:

$$c\rho \frac{\delta t}{\delta \tau} = \text{div}(\lambda \text{grad } t) + q_v \quad (1)$$

В формуле 1 использованы следующие обозначения: τ – время; t – температура; c – теплоемкость вещества; ρ – плотность вещества; λ – теплопроводность вещества и q_v – теплота, выделяющаяся внутри тела (для кладки горна всегда $q_v = 0$). В качестве источников информации о тепловом состоянии кладки используются стандартные термопары, заложенные в футеровку горна на этапе капитального ремонта или строительства доменной печи. Для решения уравнения весь объем кладки печи сегментируется на элементарные объемы, содержащие в себе температурные датчики. Внутри каждого объема датчики объединяются в расчетные группы, для которых принимаются следующие допущения:

- изотропность по объему огнеупора (коэффициент теплопроводности одинаковый во всех направлениях) [4];
- скорость изменения температуры кладки небольшая и ей можно пренебречь (квазистационарный процесс);
- внутренние источники тепла в кладке отсутствуют;
- вблизи расчетной группы тепловой поток одномерен или двумерен.

Полученные результаты расчетов для элементарных объемов объединяются в трехмерную модель при помощи механизмов адаптивной интерполяции.

Одними из самых важных параметров в рассматриваемой математической модели разгара футеровки является теплопроводность огнеупоров (λ), так как она определяет градиент температур в стенках печи и в конеч-

ном счете положение внутренней границы кладки [5]. Заявленная производителем теплопроводность огнеупоров может варьироваться от партии к партии и изменяться в реальных условиях эксплуатации блоков (например, из-за давления внутри кладки). Для решения этой проблемы нами был разработан алгоритм определения фактической теплопроводности огнеупорных блоков на основе анализа показаний температурных датчиков в процессе задувки печи (кривых разгона). Пример кривой разгона приведен на рис. 1.

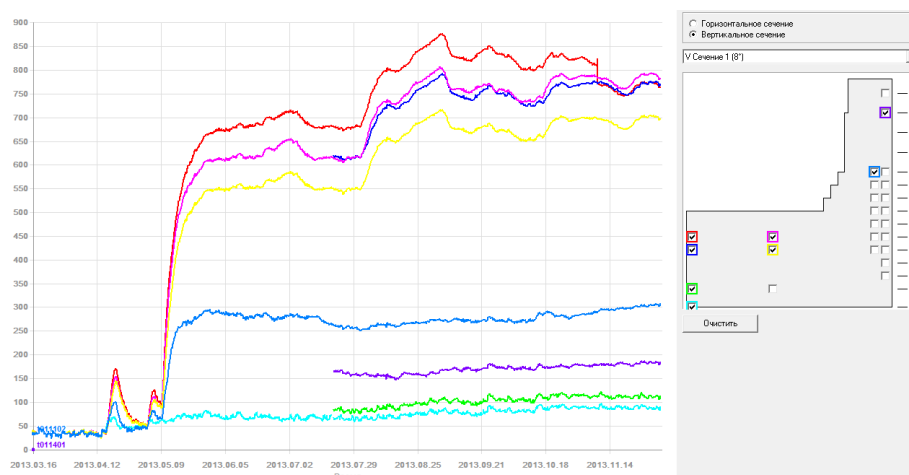


Рис. 1. Кривая разгона температур в кладке доменной печи

На основе предложенной модели специалистами Института радиоэлектроники и информационных технологий – РтФ Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина и Института металлургии Уральского отделения Российской академии наук было разработано специализированное программное обеспечение. На разработку получены авторские свидетельства № 2014610768 и № 2014610769. Внедрение программного обеспечения и исследование применимости модели было начато в 2010 году на печах КНР. Перечень печей, на которых была опробована модель, приведен в табл. 1.

Таблица 1

Внедрение программного обеспечения

№ п/п	Предприятие	Печь	Год внедрения
1	JiNan Iron & Steel Group Co.Ltd	№ 4, 3200 м ³	2010
2	JiYuan Iron & Steel Group Co.Ltd	1080 м ³	2011
3	LiuZhou Iron & Steel Group Co.Ltd	2500 м ³	2012
4	JiNan Iron & Steel Group Co.Ltd	№ 3, 1750 м ³	2013
5	JiNan Iron & Steel Group Co.Ltd	№ 1, 1750 м ³	2014

Пример результата моделирования распределения температур в печи приведен на рис. 2.

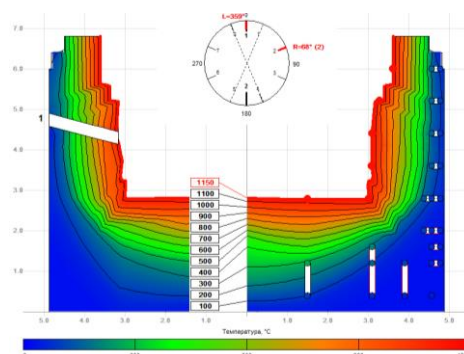


Рис. 2. Модель распределения температур в на печи Jiuyan

Опыт внедрения системы на реальных доменных печах показал ее эффективность и превосходство над аналогичными системами, обусловленное следующими особенностями:

- высокая скорость вычислений, обеспечивающая организацию мониторинга в реальном времени, в режиме 24/7;
- построение трехмерной модели разгара с использованием методов адаптивной интерполяции;
- отказ от использования заранее просчитанных профилей разгара, что позволяет гибко подходить к построению профиля разгара горна;
- малая площадь отдельных контролируемых сегментов;
- возможность использования программного обеспечения в уже существующих системах сбора данных от термопар в кладке печи;
- предусмотрена возможность адаптации модели разгара к каждой обследуемой печи за счет оригинального алгоритма анализа фактической теплопроводности огнеупоров.

Список литературы

1. Новости рынка металлов [Электронный ресурс] // <http://www.metaltorg.ru/n/99F442> (дата обращения: 01.02.2014).
2. Новости рынка металлов [Электронный ресурс] <http://www.metaltorg.ru/n/99F32F> (дата обращения: 01.02.2014).
3. Телегин А. С. Тепломассоперенос / А. С. Телегин, А. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко. М.: Металлургия, 1995. 400 с.
4. Hong-bo Zhao, Shu-sen Cheng. Optimization for the structure of BF hearth bottom and arrangement of thermal couples // Journal of University of Science and Technology Beijing. Vol. 13, N. 6. 12/2006. P. 497–503.
5. Дмитриев А. Н. Система контроля разгара огнеупорной футеровки горна доменной печи / А. Н. Дмитриев, Ю. А. Чесноков, К. Чэнь, О. Ю. Иванов, М. О. Золотых // Сталь. 2013. № 11. С. 8–14.