

15. Динамическая прогнозирующая модель конвертерного процесса на принципах неравновесности металлургических реакций / Ю.Н.Яковлев, Л.В.Камкина, Е.Н.Сигарев [и др.] // Труды II Конгресса сталеплавильщиков. ОАО «Черметинформация». – М., 1994. – С.118-120.
16. Двухъярусная гарнисажная фурма для конвертера ПАО «ДМКД» / Е.Н.Сигарев, Н.Н.Недбайло, Д.А.Семенова [и др.] // Збірник наукових праць Дніпродзержинського технічного університету: (технічні науки). – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2014. – Вип. 2(25). – С.9-16.

Поступила в редколлегию 17.09.2014.

УДК 669.184.125

СИГАРЕВ Е.Н., д.т.н., профессор
СИГАРЕВ Н.К., к.т.н., доцент
СЕМЕНОВА Д.А., аспирантка
БАЙДУЖ Ю.В., аспирант

Днепродзержинский государственный технический университет

ТОПОГРАФИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ФУТЕРОВКИ КОНВЕРТЕРА

Введение. На основании промышленного опыта принято выделять следующие характерные режимы эксплуатации кислородного конвертера, футерованного периклазоуглеродистыми огнеупорами:

- без проведения текущих ремонтов;
- периодическое нанесение модифицированного присадками специальными магнезиальносодержащих добавок конечного конвертерного шлака на футеровку раздувочной газовой струями после выпуска стали в сталеразливочный ковш;
- торкретирование и подварка магнезиальносодержащими материалами наиболее изношенных мест.

При этом наиболее затратной статьей на поддержание футеровки в рабочем состоянии остаются горячие ремонты методом подварки, доля которых составляет 34-38% от общих затрат на огнеупоры и огнеупорные материалы (83-87% затрат на горячий ремонт футеровки).

Постановка задачи. Продолжительное время рабочий слой футеровки кислородных конвертеров выполнялся из периклазоуглеродистых огнеупоров по двухслойной схеме кладки общей толщиной 1000-1050 мм в различных комбинациях (500+500, 525+525 и т.п.). Однако, как установлено по результатам промышленной эксплуатации, при небольшой остаточной толщине первого рабочего слоя (50-100 мм со стороны рабочего пространства конвертера) происходит выпадение остатков изношенных огнеупорных изделий с соответствующим увеличением затрат и сокращением продолжительности кампании агрегата.

Последние годы характеризуются стремлением к перманентному повышению стойкости футеровки конвертеров, в том числе за счет применения сбалансированной зональной схемы кладки огнеупорных изделий с учетом особенностей и преобладающих факторов износа отдельных зон. В таком случае в различных зонах футеровки конвертера используются отличающиеся по качеству и составу изделия (т.н. дифференцированная кладка), что, в конечном счете, приводит к относительно равномерному износу футеровки.

На начальном этапе при разработке и внедрении дифференцированной кладки и уходе за ней в течение кампании на большей части предприятий использовали визуальный контроль износа огнеупорного слоя, характеризующийся невысокой точностью и субъективностью оценки. Масса и толщина намороженного раздувочной шлаковой ванны

на футеровку шлакового гарнисажа, в последующем частично переходящего в шлак, при визуальном осмотре не поддается количественной оценке, что осложняет расчет материального баланса конвертерной плавки. В отдельных случаях визуальная оценка состояния рабочего пространства дополнялась термографическим контролем для определения температуры наружной поверхности кожуха конвертера и принятия решений о необходимости горячего ремонта.

Необходимо особо отметить, что с переходом от схем футеровки конвертера в два оката к более прогрессивной однослойной футеровке уровень субъективности визуальных методов оценки в связи с отсутствием границы между рабочим и арматурным слоем увеличился, что повысило актуальность применения высокоточных средств топографирования поверхности.

К современным средствам для топографических исследований текущего профиля рабочего пространства и определения остаточной толщины футеровки конвертера относят лазерные системы измерения (например, *Delta RL 2000* (Финляндия), *LaCam-M* (фирма *Ferrotron Technologies GmbH*, Германия), *CONSCAN X2* (фирма *RHI*, Австрия) и др.) [1-3].

С целью контроля остаточной толщины футеровки по ходу кампании, установления зон локального износа и их ликвидации, выбора вида и корректировки количества горячих ремонтов, прогнозирования возможного срока кампании конвертера на ряде металлургических предприятий Украины применяют сканер *LaCam M007* (фирмы *Ferrotron Technologies GmbH*, Германия) (рис.1, а).

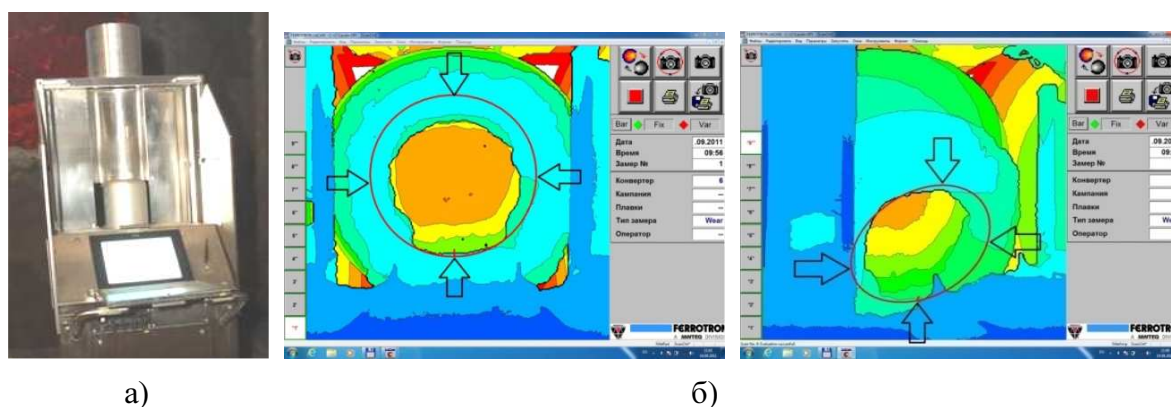


Рисунок 1 – Общий вид сканера (а) и отображение (б) на экране монитора контролируемых зон рабочего пространства конвертера

В целом, лазерная система измерения предназначена для топографирования поверхности футеровки конвертера с точностью измерения ее толщины ± 5 мм. Остаточная толщина футеровки определяется сравнением предыдущих и текущих результатов замеров внутреннего пространства агрегата. Результаты измерения отображаются на экране монитора и сохраняются в базе данных для оперативного и последующего детального анализа. Длительность одного сканирования футеровки конвертера составляет 20-25 минут.

Лазерное измерение основано на определении времени распространения единичного светового импульса. При этом светодиод на базе полупроводникового лазера генерирует излучение с очень малой длиной волны, а оптический импульс отражается от поверхности объекта измерения и попадает в светоприемник. По ходу сканирования одновременно происходит сканирование поверхности футеровки и автопозиционирование системы, основанное на определении базисных точек, установленных около агрегата.

В рекомендованном производителем оборудования варианте измерение внутреннего пространства агрегата выполняют по приведенной в табл.1 схеме.

Таблица 1 – Схема топографирования рабочего пространства конвертера

Стойкость футеровки, плавки	Периодичность сканирования
20 – 50	первое сканирование обязательно
до 1000	через каждые 500 плавок
1000 – 2000	через каждые 250 плавок
2000 – 3000	через каждые 200 плавок
более 3000	через каждые 150 плавок

Полная информация о состоянии футеровки конвертера получается после проведения ряда замеров и обработки полученных данных:

- развертка конвертера (определение зон, подлежащих неотложному ремонту);
- вертикальные разрезы в области цапф (приводной и неприводной);
- вертикальные разрезы в плоскости свод – ванна;
- горизонтальные сечения и днище конвертера.

Результаты работы. В данной статье приведены результаты топографирования поверхности периклазоуглеродистой футеровки 160-т и 250-т кислородных конвертеров верхнего дутья с использованием лазерной системы измерений *LaCam M007* по ходу кампании.

Как на 160-т, так и на 250-т конвертерах применялась однослойная схема кладки, при этом в цилиндрической части 160-т агрегата огнеупоры укладывали в один окат толщиной 900 мм, в верхней конической части – 650 мм, в 250-т – в один окат толщиной 800 мм и 650 мм в верхней конической части соответственно.

Применяемые для кладки футеровки 160-т и 250-т конвертеров огнеупорные изделия имели отличия по составу:

- в зоне металла (нижней сферической части) использовали изделия с содержанием $MgO \geq 84,0\%$, углерода не менее 6,0% (160-т конвертер) и $MgO \geq 71,0\%$ и углерода более 13,0% – в 250-т конвертере соответственно;
- в загрузочной и сливной зонах (ванна и свод) – с содержанием MgO не менее 78% и содержанием углерода $\geq 12,0\%$ для 160-т и не менее 68% и углерода $\geq 15,0\%$ для 250-т соответственно;
- в цапфенной зоне футеровка рабочего слоя была усилена за счет использования изделий с повышенным содержанием углерода $\geq 14,0\%$, при содержании $MgO \geq 76,0\%$ в 160-т и углерода $\geq 16,0\%$, при содержании $MgO \geq 71,0\%$ – в 250-т конвертере;
- в верхней конической части 160-т агрегата использовали огнеупоры с содержанием $MgO \geq 80,0\%$ и углерода не менее 10,0%, а в 250-тонном – $MgO \geq 61,0\%$ и углерода не менее 14,0%.

Отличия в химическом составе огнеупоров кладки 160-т и 250-т конвертеров, условий эксплуатации и обслуживания футеровки, дутьевого и шлакового режимов привели к закономерным различиям профилей износа футеровки агрегатов по ходу кампании.

С целью определения наиболее значимых факторов износа огнеупоров на 160-т конвертерах были проведены несколько опытных кампаний, отличия которых от сравнительных заключались в следующем. В ходе сравнительной кампании плавок на конвертере «А» проводили полное текущее обслуживание футеровки с соблюдением требований технологической инструкции: с нанесением шлакового гарнисажа, периодической подваркой, локальным торкретированием наиболее изношенных мест. При этом

присадку специальных магнезиальных шлакообразующих флюсов по ходу плавки не осуществляли.

В ходе опытных кампаний на конвертерах «Б» и «В» была изучена возможность использования в существующих сырьевых условиях «европейской» схемы эксплуатации агрегата с минимизацией либо полным отсутствием ухода за футеровкой. В таком варианте нанесение шлакового гарнисажа на футеровку в первый период кампании не проводили. В то же время, с целью снижения интенсивности износа футеровки, по ходу конвертерной плавки присаживали специальные магнезиальные шлакообразующие флюсы с удельным расходом 0,3 кг/т стали.

Необходимо отметить, что в связи с установленной топографированием по ходу кампании повышенной в сравнении с конвертером «А» интенсивностью износа слоя огнеупоров на конвертере «Б» было принято решение о необходимости возобновления операций по уходу за футеровкой для предотвращения преждевременного вывода агрегата из эксплуатации. При этом ошлакование футеровки конвертера «А» с помощью раздувки шлака начали проводить после 150 плавки, на конвертере «Б» – только после 830-й плавки.

Число операций ошлакования, проведенных по технологии корректировки содержания (MgO) путем непосредственного вдувания доломита в шлаковую ванну через специальную газопорошковую гарнисажную фурму [4], составило 590 на конвертере «А» и 280 операций на конвертере «Б». На рис.2 приведены результаты сканирования футеровки конвертера «Б» после 1400-й плавки.

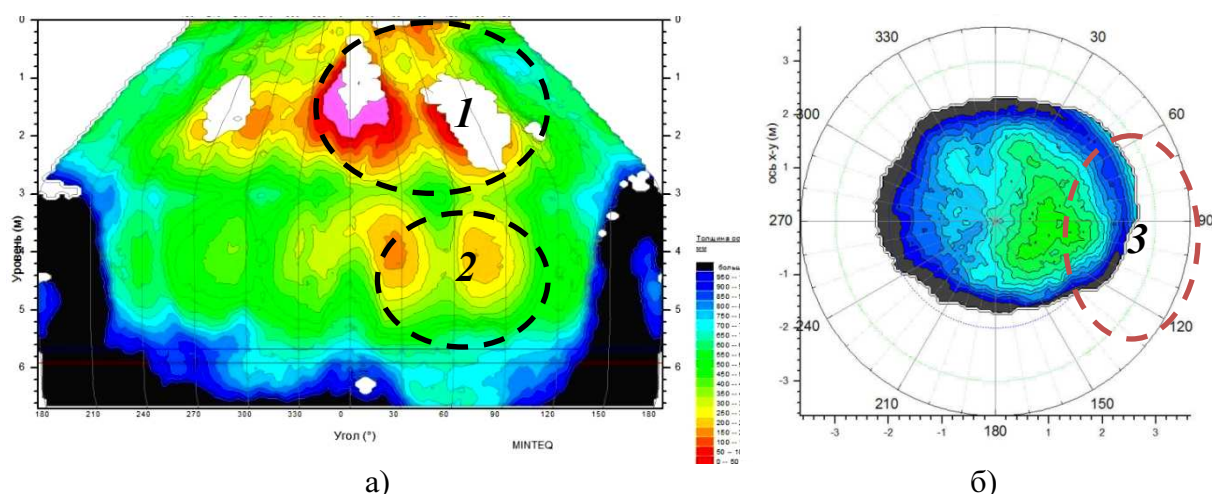


Рисунок 2 – Топограмма футеровки с выделением зон повышенного износа стен (а) и дна (б) конвертера «Б» (остаточная толщина огнеупоров) после 1400 плавков

Места интенсивного износа футеровки расположены на сводовой 1 (на стороне выпуска стали) и цапфенной 2 (неприводной) зонах (рис.2, а). В значительной степени это обусловлено смещением реакционных подфурменных зон в сторону неприводной цапфы 3 (сегмент 60°-120°), что подтверждается результатами сканирования дна конвертера (рис.2, б).

В соответствии с результатами сканирования (в период с 30 по 1600 плавку) средняя интенсивность износа огнеупорной кладки конвертера «Б» составила 0,428 мм/плавку, а конвертера «А», при аналогичной стойкости (1600 плавков) – 0,267 мм/плавку, т.е. меньше на 0,161 мм/плавку. Динамика интенсивности износа футеровки конвертеров «А» и «Б» приведена на рис.3.

Существенная неравномерность износа при исключении операций ошлакования подтверждается и динамикой износа огнеупорной кладки в двух наиболее подверженных

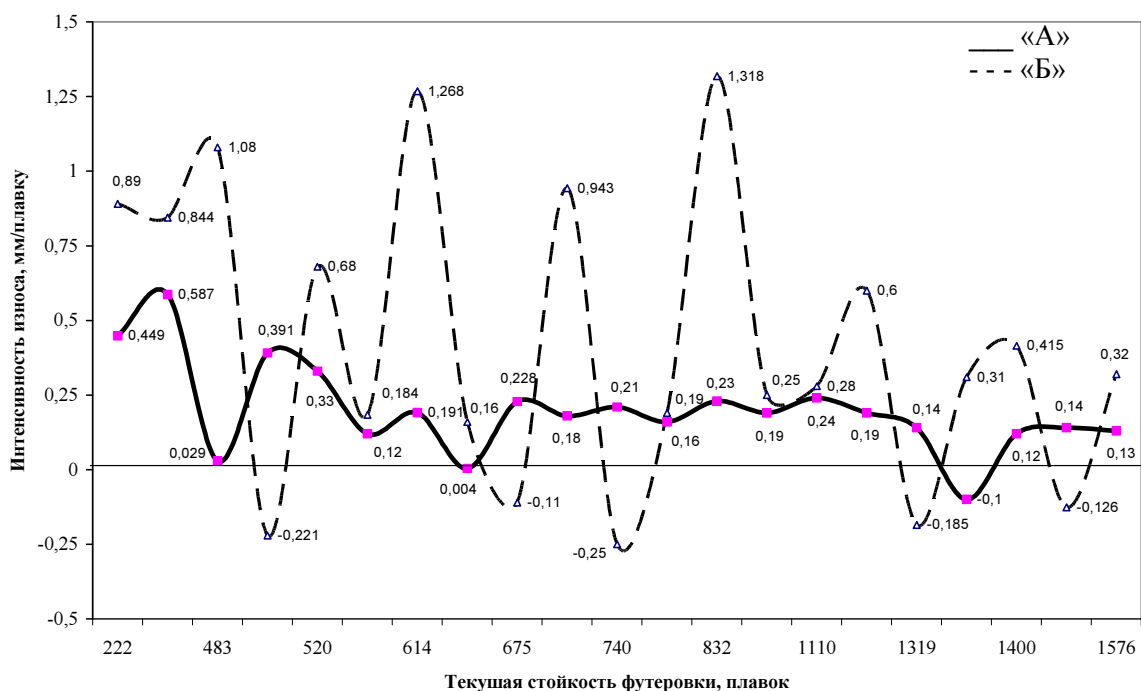


Рисунок 3 – Интенсивность износа футеровки конвертеров в первый период сравнительной (конвертер «А») и опытной (конвертер «Б») кампаний

износу диаметрально противоположных зонах шлакового пояса конвертера (зона приводной и не приводной цапф) (рис.4).

Из представленных данных (рис.3, 4) видно, что износ футеровки конвертера «Б» в отличие от конвертера «А» характеризуется значительным диапазоном колебаний (от 1,318 до - 0,25 мм/плавку). Амплитуда износа огнеупорной кладки на конвертере «А», особенно после обязательного проведения операций нанесения шлакового гарнисажа на футеровку после каждой плавки (после 460-й плавки), существенно меньше.

Более широкий диапазон колебаний и существенная неравномерность износа футеровки конвертера «Б» объясняется также ранним началом (уже после 490 плавки) и увеличением числа подварок и локального торкретирования, что привело к отклонению профиля агрегата от требуемого.

Прогнозируемое в случае сохранения такой динамики износа снижение стойкости футеровки конвертера «Б» в сравнении с конвертером «А» должно было составить около 200-250 плавков. Этот прогноз оправдался, разница в стойкости футеровки по итогам кампании составила 196 плавков с соответствующим сокращением объема выплавленной стали. В целом, по результатам завершённых кампаний средняя интенсивность износа футеровки конвертера «А» составила 0,280 мм/плавку в сравнении с 0,373 мм/плавку на конвертере «Б».

Выявленные закономерности нашли подтверждение в ходе кампании на конвертере «В», проведенной в сходных условиях (состав шихты, огнеупоров и т.п.) с кампанией конвертера «А».

Из-за неисправности оборудования для раздувки конечного шлака на футеровку шлаковый гарнисаж на стены конвертера «В» начали наносить на 760 плавков позже, чем на конвертере «А» (только с 912-й плавки), что привело к ускоренному износу футеровки (табл.2).

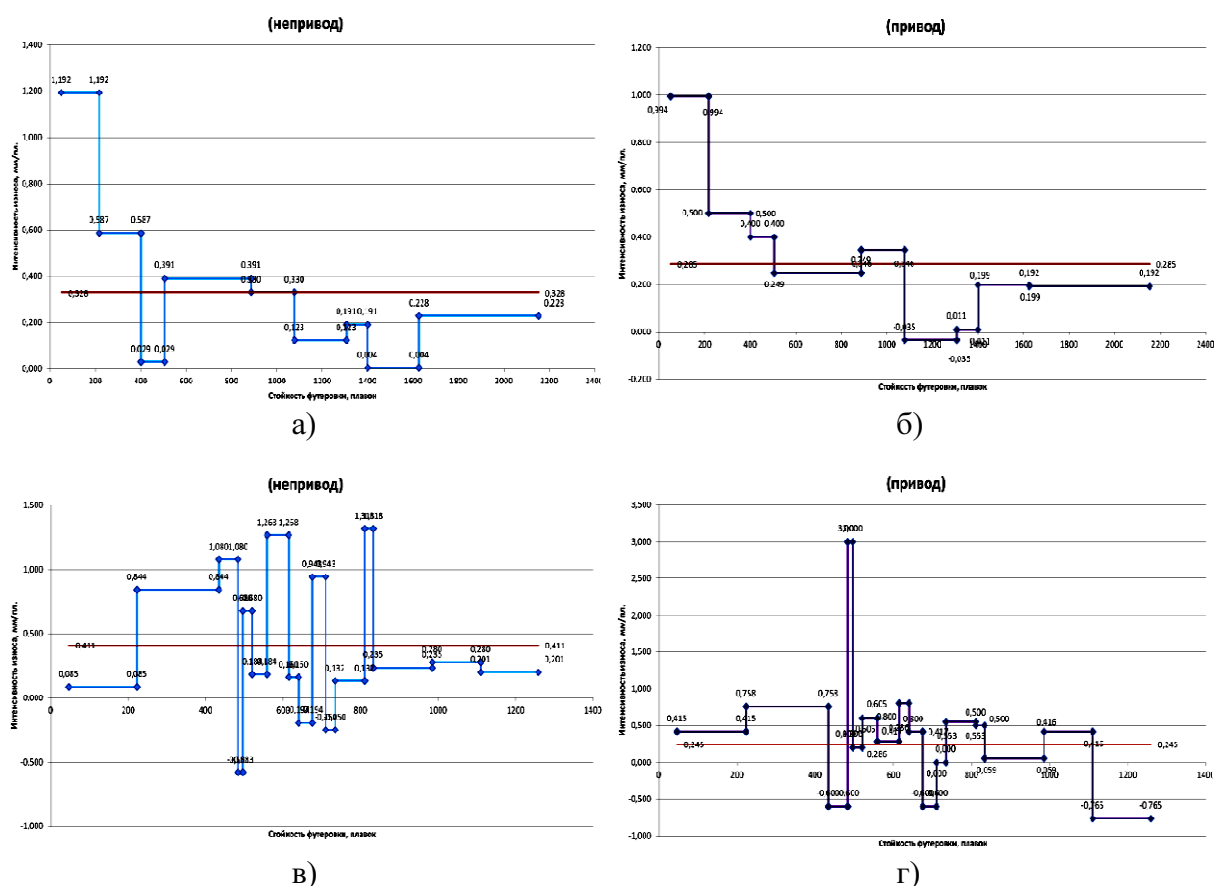


Рисунок 4 – Динамика износа футеровки 160-т конвертеров в период эксплуатации с нанесением (конвертер «А», а, в) и без нанесения шлакового гарнисажа раздувкой шлаковой ванны (конвертер «Б», б, г)

Таблица 2 – Показатели горячих ремонтов футеровки конвертеров

Наименование показателей	Ед.изм.	конвертер «А»	конвертер «В»
Период работы конвертера		февраль-май	март-май
Начальная толщина футеровки	мм	900	900
Стойкость футеровки, текущая	пл.	1626	1084
- торкретирование + раздувка шлака на футеровку	нач.пл.	610	1229
	п _{операций}	630	0
- раздувка конечного шлака на футеровку	начало	152	912
	п _{операций}	1034	118
	% от общего числа плавков	63,7	10,9
- локальное торкретирование и подварки	п _{операций}	38	25
	% от общего числа плавков	2,3	2,3

В результате на конвертере «А» после 1626 плавков минимальная остаточная толщина огнеупоров в цилиндрической части составила 359 мм (рис.5, а; зоны 1, 2). Учитывая, что начальная толщина рабочего слоя футеровки 900 мм, средняя интенсивность её износа с начала кампании на момент замера – 0,333 мм/плавку, а прогнозируемая стойкость рабочего слоя при условии проведения горячих ремонтов составит более 3200 плавков.

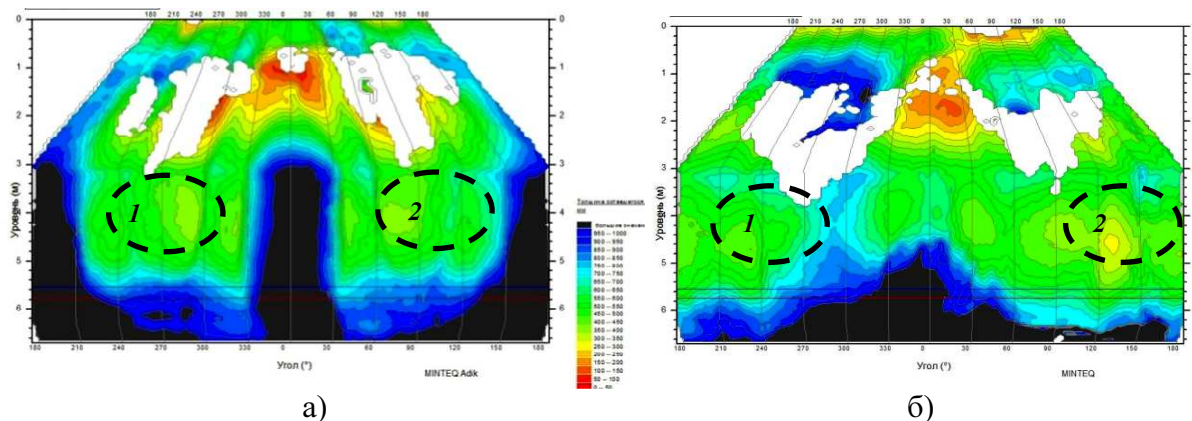


Рисунок 5 – Топограмма футеровки конвертера «А» на 1626 плавке (а) и конвертера «В» после 1084 плавки (б)

В то же время, на конвертере «В» после 1048 плавков минимальная остаточная толщина огнеупоров в цилиндрической части составила только 280 мм (рис.5, б). Средняя интенсивность её износа с начала кампании на момент сканирования составила 0,572 мм/плавку, а прогнозируемая стойкость рабочего слоя при условии эксплуатации без проведения операций ошлакования футеровки не превысит 1573 плавков.

Таким образом, применение «европейской» схемы эксплуатации футеровки (без периодического нанесения защитного гарнисажного слоя путем раздувки модифицированного конечного шлака) нецелесообразно.

Использование сканирования для оперативного контроля текущего профиля футеровки позволяет также предупредить возникновение аварийных ситуаций, связанных с прогаром брони агрегата вследствие уменьшения огнеупорного слоя менее допустимых пределов.

С целью выбора на основании результатов сканирования требуемого способа горячего ремонта был разработан комплекс показателей, характеризующих отклонение профиля футеровки конвертера по ходу кампании от оптимального [5].

Анализ предложенной методики показал, что наиболее информативным для управления топографией поверхности футеровки конвертера служит $Q_B(i)$ – интегральный показатель динамики отклонения внутренней топографии футеровки конвертера от требуемой, для расчета которого предложены выражения:

$$Q_B(i) = 1/L \sum_{l=1}^L |Q_{Bi}(i)|; \quad (1)$$

$$Q_{Bi}(i) = 1/2H \sum_{h=1}^{2H} |R_{l,n_h}(i) - R_{l,n_h}^T|, \quad (2)$$

где i – номер плавки по футеровке ($i=1, L$); l – номер вертикального сечения конвертера ($l=1, L$); n_h – номер горизонтального сечения конвертера ($n_h=1 \dots H$); $Q_{l,i}(i)$ – значение показателя в l -м сечении на i -й плавке; $R_{l,n_h}(i)$ – радиус футеровки конвертера в точке (l -м горизонтальном и h -м вертикальном сечении) на i -й плавке; R_{l,n_h}^T – радиус футеровки с требуемым значением в точке на i -й плавке.

Методика обеспечения требуемой топографии футеровки конвертера заключается в выполнении операций горячего ремонта (корректировки профиля) с использованием результатов сканирования и расчетов по выражению (1):

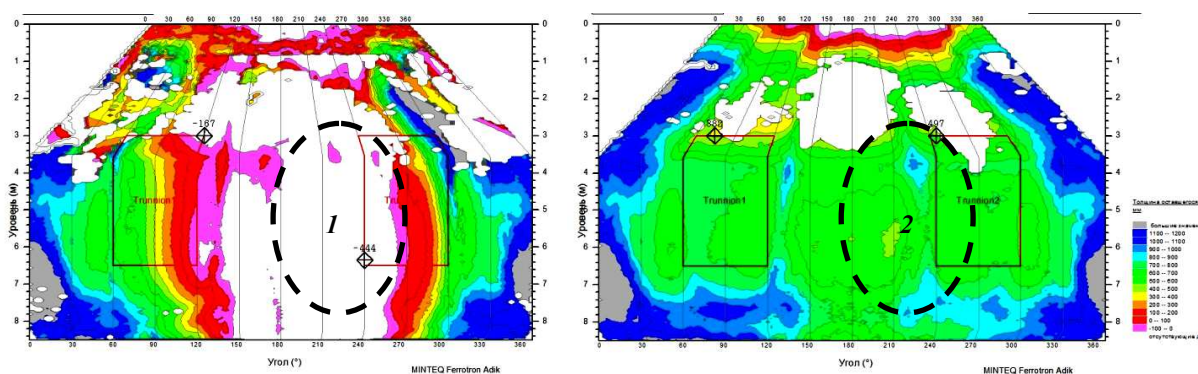
а) если $Q_B \leq 150$ мм, то производится раздувка конечного шлака с добавками расчетного количества магнийсодержащих материалов с последующим поворотом конвертера на 90 градусов в сторону слива и загрузки;

б) если $150 \text{ мм} \leq Q_B \leq 200$ мм, то производится полусухое торкретирование мест интенсивного износа;

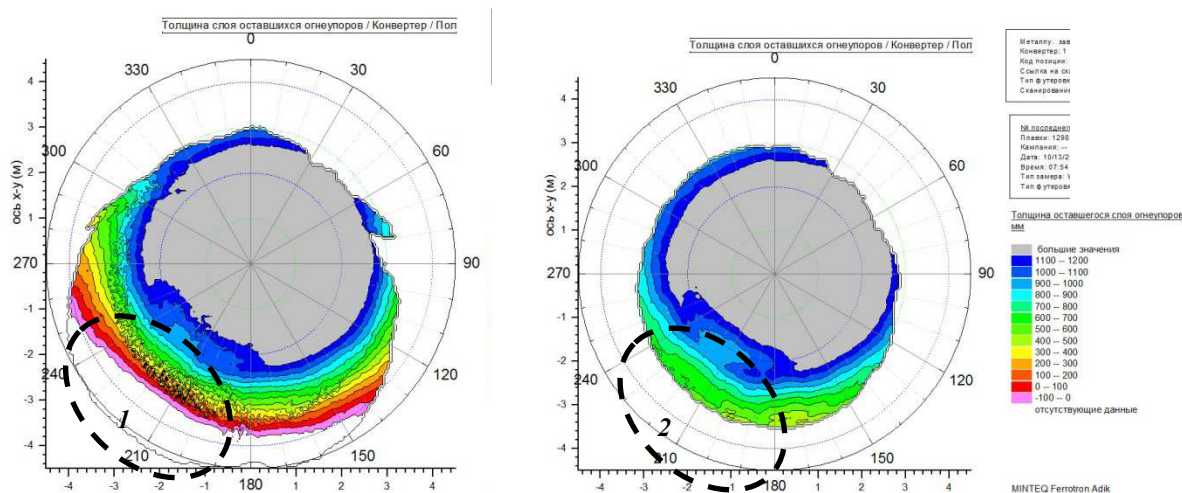
с) если $200 \text{ мм} \leq Q_B \leq 300 \text{ мм}$, то производится торкретирование с нанесением больших объемов огнеупорных масс на площадь до 50% поверхности футеровки толщиной до 100-150 мм;

д) если $Q_B > 300 \text{ мм}$, то осуществляется подварка магнийсодержащими материалами.

Отработку предложенной комплексной методики проводили на 250-т конвертере. Установлены зоны износа футеровки до аварийно опасных значений (рис.6). Использование результатов сканирования футеровки и расчетов по выражению (1) обеспечило повышение эффективности (сокращение продолжительности операций и удельного расхода ремонтных масс) выполнения горячих ремонтов как путем подварки и локального торкретирования установленных зон интенсивного износа (рис.6, 7), так и последующих операций торкретирования и нанесения модифицированного шлака на футеровку. Требуемая для проведения ошлакования масса магнезиальносодержащего материала, присаживаемого в шлаковую ванну, определялась с учетом характеристик конечного шлака, положение гарнисажной фурмы по ходу раздувки шлака – с учетом выявленных отклонений профиля от требуемого.



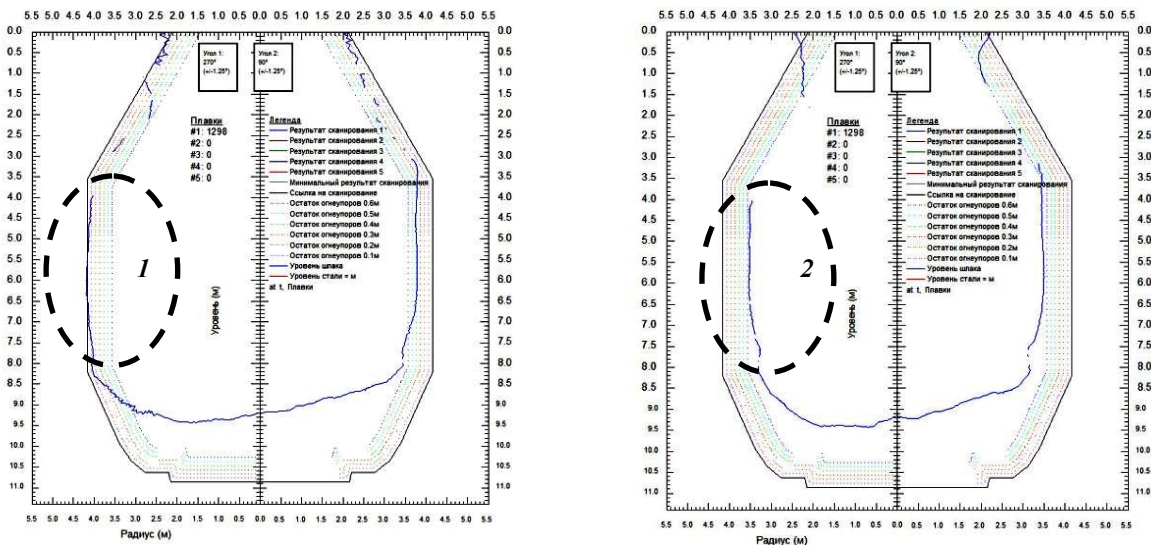
а)



б)

Рисунок 6 – Топограмма стен (а), дна (б) 250-т конвертера на 1298 плавке (вертикальный разрез в плоскости цапфенных зон) до (1) и после (2) проведения горячего ремонта футеровки

С учетом теоретического обоснования [6] и анализа результатов ошлакования рациональным является поддержание текущей толщины футеровки конвертера по ходу кампании на уровне 350-400 мм (для 160-т) и 300-350 мм (для 250-т агрегата).



1 – зона аварийного уменьшения толщины рабочего слоя;
2 – восстановленный слой футеровки

Рисунок 7 – Профиль футеровки 250-т конвертера на 1298 плавке (вертикальный разрез в плоскости цапфенных зон) до (1) и после (2) проведения горячего ремонта

Выявлен ряд факторов, оказывающих существенное влияние на интенсивность износа футеровки и практически не зависящих от садки конвертера:

- содержание $Fe_{общ}$ в конечном конвертерном шлаке (коэффициенты корреляции ($K_k = 0,47$ и $0,65$ для 160-т и 250-т конвертера соответственно);
- количество плавов с начальным содержанием серы в чугуне более $0,040\%$ ($K_k = 0,31$ и $0,38$ соответственно);
- количество плавов с температурой чугуна менее $1320^\circ C$ ($K_k = 0,33$ и $0,47$ соответственно);
- количество плавов с температурой стали на выпуске более $1610^\circ C$ ($K_k = 0,33$ и $0,29$ соответственно);
- количество плавов с содержанием углерода в стали на выпуске из конвертера менее $0,04\%$ ($K_k = 0,36$ и $0,61$ соответственно).

С целью дальнейшего снижения удельных затрат на огнеупоры и уменьшения амплитуды колебаний интенсивности износа футеровки, приводящих к изменению профиля рабочего пространства агрегата, необходимо дальнейшее совершенствование и отработка рационального шлакового режима и схемы ввода в шлаковую ванну магнезиальных добавок. К основным элементам такой схемы можно отнести:

- ввод строго определенной, в зависимости от химического состава чугуна, части магнезиальных добавок в завалку либо в первый период продувки с целью насыщения первичного шлака оксидами магния и предупреждения химического износа;
- ввод определенной части магнезиальных материалов в период $80-100\%$ времени продувки для повышения степени их усвоения, насыщения шлака MgO и компенсации повышения растворения огнеупорного слоя в окисленном конвертерном шлаке в завершающий период продувки;
- в зависимости от состояния шлаковой ванны ввод быстрорастворимых магнезиальных флюсов или вдувание [5] порошкообразных магнезиальных материалов в шлаковую ванну непосредственно по ходу раздувки последней на стены конвертера.

Выводы. Топографирование поверхности футеровки конвертера с использованием сканера позволяет выявить расположение зон повышенного износа огнеупорной

кладки и получить достоверные данные о текущем профиле рабочего пространства в различные периоды кампании агрегата.

Комплексный анализ с совместным использованием интегрального показателя динамики отклонения внутренней топографии футеровки конвертера от требуемой и результатов сканирования рабочего пространства позволит:

- предотвратить возникновение аварийных ситуаций при эксплуатации агрегата;
- поддерживать требуемые параметры топографии внутренней поверхности футеровки по ходу кампании с обоснованием рациональных способов ремонта.
- сократить простои агрегата и удельный расход дорогостоящих магнезиальных материалов и флюсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронина О.Б. Совершенствование методов контроля за эксплуатацией футеровки конвертера / Воронина О.Б., Овсянников В.Г., Дюльдина Э.В. // Известия Челябинского научного центра. – 2003. – Вып. 1 (18). – С.32-38.
2. Методы исследования характера износа огнеупорных футеровок конвертеров / Х.В.Гуденау, Х.Нефе, Р.Хёффкен [и др.] // Черные металлы. – 1997. – № 5. – С.23-29.
3. Ламм Р. Использование технологии 3-х размерного лазерного сканирования в качестве технологического инструмента в конвертерном цехе / Ламм Р., Винтьенс П. // Труды восьмого конгресса сталеплавателей, г. Нижний Тагил, 18-22 окт. 2004 г. – М: ОАО «Черметинформация», 2005. – С.97-102.
4. Новые технологические режимы нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера / А.Г.Чернятевич, Е.Н.Сигарев, И.В.Чернятевич [и др.] // Теория и практика металлургии. – 2011. – №5-6. (часть II (83-83)). – С.19-27.
5. Петрунин С.М. О совместном синтезе объектов и управляющих систем / С.М.Петрунин, Л.П.Мышляев // Системы управления и информационные технологии. – 2007. – Вып.3(29). – С.185-187.
6. Суворов С.А. Динамика образования гарнисажного слоя на поверхности футеровки конвертера и ресурс эксплуатации / Суворов С.А., Козлов В.В. // Огнеупоры и техническая керамика. – 2009. – №7-8. – С.3-6.

Поступила в редколлегию 18.09.2014.

УДК 669.184

ЧЕРНЯТЕВИЧ А.Г., д.т.н., профессор
СИГАРЕВ Е.Н., д.т.н., профессор
ЧУБИНА Е.А., к.т.н., доцент
РУДЕНКО Р.Н., аспирант

Днепродзержинский государственный технический университет

РАЗРАБОТКА ДУТЬЕВОГО И ШЛАКОВОГО РЕЖИМОВ ПЛАВКИ ДЛЯ БОЛЬШЕГРУЗНОГО КОНВЕРТЕРА

Введение. Результаты теоретического обоснования и моделирования продувки конвертерной ванны [1] были использованы для разработки и проведения испытаний конструкции наконечника кислородной фурмы, предназначенного для интенсификации продувки конвертерной ванны. Отработка дутьевого и шлакового режимов плавки проведена в 330-т конвертере с комбинированной продувкой КЦ №2 ОАО «НЛМК».

Постановка задачи. Выполненный анализ технической литературы [2-4], отражающей результаты отработки и освоения в кислородно-конвертерных цехах Украины