Металлургические технологии / Metallurgical technologies

УДК 669.1
DOI 10.17073/0368-0797-2024-5-520-530

CC BY

Оригинальная статья
Original article

Оценка результативности применения технологических мероприятий по продлению кампании доменной печи № 5 ПАО «Северсталь» 2006 – 2024 гг. при исследовании ее рабочего пространства в период проведения капитального ремонта I разряда

А. А. Калько[1], Л. И. Леонтьев[2, 3], Е. А. Волков[1]

[1] **ПАО «Северсталь» Череповецкий металлургический комбинат** (Россия, 162608, Вологодская область, Череповец, ул. Мира, 30)
[2] **Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина** (Россия, 105005, Москва, ул. Радио, 23/9)
[3] **Президиум РАН** (Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 32а)

aakalko@severstal.com

Аннотация. В работе представлен опыт изучения рабочего пространства доменной печи № 5 ПАО «Северсталь» по результатам кампании 2006 – 2024 гг. продолжительностью 17,46 лет, существенно превысившей нормативные сроки эксплуатации. Выполнена оценка результативности технологических мероприятий по продлению кампании доменной печи, применявшихся для защиты огнеупорной футеровки в критических зонах горна, нижней части шахты и верха заплечиков. Авторы провели анализ остаточной толщины огнеупорной футеровки шахты, горна и металлоприемника доменной печи, сформировали карты фактического разгара огнеупорной футеровки по различным сечениям. Измеренный максимальный износ огнеупорной футеровки шахты составил 344 мм или 37,4 % первоначальной величины, измеренный максимальный разгар углеродистых блоков в районе выгребных проемов – 313 мм или 23,4 % первоначального размера блока. В верхней части горна минимальная остаточная толщина огнеупоров с содержанием Al_2O_3 = 43 % составила 220 мм или 31,9 % исходной величины. Представлены способы безопасного дистанционного измерения фактического профиля шахты доменной печи с помощью лазерного 3D сканирования в процессе выгребки остатков шихтовых материалов. Время выполнения 3D сканирования в рабочем пространстве печи составило 50 мин. В работе проведен сравнительный анализ фактической остаточной толщины футеровки в районе углеродистых блоков горна и лещади и высокоглиноземистых огнеупоров фурменной зоны с результатами оценок с использованием технологии ультразвукового зондирования эхо-методом (AU-E), выполнявшихся в период работы доменной печи. Приведено описание технологии распространения волн напряжения с использованием анализа данных в временном и частотном домене для определения толщины футеровки или для обнаружения аномалий. Авторы провели сравнение результатов предыдущей и текущей кампаний доменной печи по объему произведенного чугуна, количеству вышедших из строя элементов системы охлаждения, износу огнеупоров по всему рабочему пространству доменной печи. Суммарное производство чугуна в кампании 2006 – 2024 гг., отнесенное к площади горна, составило 420,0 тыс. т/м^2 и превысило показатель предыдущей кампании в 1,90 раза.

Ключевые слова: доменная печь, 3D сканирование, остаточная толщина футеровки, разгар горна, продолжительность кампании, ПАО «Северсталь», горн, шахта, тотерман, промывка горна, гарнисажеобразование, удельный расход природного газа, расход твердого топлива на тонну чугуна, ультразвуковое зондирование эхо-методом, железорудные материалы, кокс, показатель CSR

Для цитирования: Калько А.А., Леонтьев Л.И., Волков Е.А. Оценка результативности применения технологических мероприятий по продлению кампании доменной печи № 5 ПАО «Северсталь» 2006 – 2024 гг. при исследовании ее рабочего пространства в период проведения капитального ремонта I разряда. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(5):520–530.
https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-5-520-530

© А. А. Калько, Л. И. Леонтьев, Е. А. Волков, 2024

Assessment of the effectiveness of technological measures to extend the campaign of blast furnace No. 5 of PJSC Severstal (2006 – 2024) based on an examination of its working space during a first-category overhaul

A. A. Kal'ko[1], L. I. Leont'ev[2, 3], E. A. Volkov[1]

[1] **PJSC Severstal, Cherepovets Steel Mill** (30 Mira Str., Cherepovets, Vologda Region 162608, Russian Federation)
[2] **I.P. Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy** (23/9 Radio Str., Moscow 105005, Russian Federation)
[3] **Scientific Council on Metallurgy and Metal Science of Russian Academy of Sciences (Department of Chemistry and Material Sciences)** (32a Leninskii Ave., Moscow 119991, Russian Federation)

aakalko@severstal.com

Abstract. The paper presents the findings from the study of the working space of blast furnace No. 5 of PJSC Severstal during its first-category overhaul in 2024 lasting 17.46 years, which significantly exceeded the standard service life. The effectiveness of technological measures taken to extend the furnace's campaign from 2006 to 2024, aimed at protecting the refractory lining in critical areas such as the hearth, lower shaft, and the upper bosh, was evaluated. The residual thickness of the refractory lining in the shaft, hearth, and metal receiver is analyzed, and maps showing the actual thickness of the lining across different sections are generated. The measured maximum wear of the shaft refractory lining is 344 mm (37.4 % of the original value); the measured maximum wear of carbon blocks in the area of cesspool openings – 313 mm (23.4 % of the original block size). In the upper part of the hearth, the minimum residual thickness of refractories with an Al_2O_3 content of 43 % is 220 mm or 31.9 % of the initial value. The paper also discusses safe remote measurement methods, including 3D laser scanning of the furnace shaft during the removal of residual charge materials. It highlights the advantages of ground-based laser scanners in capturing dense, high-quality 3D geometric data. Additionally, the paper describes the experience of remotely measuring the residual thickness of carbon blocks around the raking openings. Comparisons are made between the actual residual thickness of the refractory lining in the hearth, bottom carbon blocks, and high-alumina refractories of the tuyere zone, and the results obtained using ultrasonic echo-sounding technology (AU-E) during the furnace's operation. The paper also includes a description of the stress wave propagation technology, which utilizes data analysis in the time and frequency domains to determine lining thickness and detect anomalies. The results of the current and previous blast furnace campaigns are compared in terms of pig iron production, the number of cooling system failures, and refractory wear across the entire working space of the furnace. The total production of pig iron in the 2006 – 2024 campaign, related to the furnace area, amounted to 420.0 thousand tons/m^2 and exceeded the figure for the previous campaign by 1.90 times.

Keywords: blast furnace, 3D scanning, residual lining thickness, hearth erosion, campaign duration, PJSC Severstal, hearth, shaft, totterman, hearth washing, skull formation, specific natural gas consumption, solid fuel consumption per ton of pig iron, ultrasonic echo sounding, iron ore materials, coke, CSR indicator

For citation: Kal'ko A.A., Leont'ev L.I., Volkov E.A. Assessment of the effectiveness of technological measures to extend the campaign of blast furnace No. 5 of PJSC Severstal (2006 – 2024) based on an examination of its working space during a first-category overhaul. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(5):520–530. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-5-520-530

Введение

Увеличение длительности кампании доменной печи (ДП), периода между капитальными ремонтами первого разряда, позволяет снизить себестоимость производства чугуна. Для повышения продолжительности межремонтного периода разрабатываются как технические, так и технологические мероприятия. Эффективность применения данных мероприятий оценивается, как правило, по результатам завершившейся кампании печи с учетом ее длительности и объема чугуна, произведенного в межремонтный период. При этом момент завершения кампании определяется в первую очередь достижением минимально допустимой остаточной толщины огнеупорной футеровки. Многие исследователи отмечают, что достижение длительной безопасной и безаварийной работы ДП в значительной мере определяется именно стойкостью лещади и горна [1 – 4]. Если замер остаточной толщины футеровки шахты ДП можно осуществлять периодически, на кратковременных остановках агрегата, при опускании уровня засыпи шихты, то непосредственные измерения толщин огнеупоров лещади и горна в течение кампании крайне затруднены, оценка износа может производится только методами неразрушающего контроля [5]. Тем более ценной становится информация о фактическом состоянии огнеупоров в рабочем пространстве печи, которую можно получить в период остановки агрегата на перефутеровку, как правило, при проведении капитального ремонта I разряда. Данная информация позволяет не только оценить адекватность применяемых в течение кампании печи методов неразрушающего контроля и расчетных моделей оценки толщины футеровки, но и дает возможность определить критические зоны, требующие защиты и корректировки технологии плавки в будущем.

В данной работе представлен опыт изучения рабочего пространства ДП № 5 ПАО «Северсталь» в период проведения капитального ремонта первого разряда в 2024 г. Печь отработала в кампании с 20.10.2006 по

02.04.2024 гг. 17,46 лет (далее по тексту – текущая кампания), существенно превысив нормативные сроки эксплуатации, характерные для ДП схожей конструкции. За кампанию на печи выплавлено более 75 млн т чугуна, что превышает суммарную выплавку чугуна за первые две кампании. Результаты достигнуты на ДП «классической» конструкции, без принципиальных капиталоемких изменений в огнеупорной футеровке шахты и горна доменной печи, за счет разработки новых способов ведения, контроля и корректировки технологии выплавки чугуна [6].

Предпосылки проведения исследований

По результатам исследования рабочего пространства ДП № 5, выдутой по окончанию предыдущей кампании 1995 – 2006 гг., на основании низких остаточных толщин огнеупоров и отсутствии (или малого количества) защитного гарнисажа были определены зоны, требующие защиты и корректировки технологии плавки в кампании 2006 – 2024 гг.: горн, нижняя часть шахты и верх заплечиков.

В текущей кампании печи был сформирован комплекс мероприятий по регулярной промывке горна от коксового мусора и флюсовых остатков, поддержанию устойчивого самообновляющегося гарнисажа в нижней части шахты, эффективному распределению различных видов твердого топлива по сечению печи, подробно описанный в работе [6]. Необходимость оценки результативности разработанных мероприятий стала основанием для реализации программы исследования рабочего пространства ДП № 5 в период капитального ремонта 2024 г. Следует отметить, что производительность ДП № 5 составляет до 40 % общего объема производства чугуна ПАО «Северсталь», что накладывает жесткие временные ограничения на сроки ремонта и продолжительность любых исследований, способствующих увеличению данных сроков. На этом основании было принято решение минимизировать нахождение людей в момент измерений в рабочем пространстве печи и максимально применять современные методы дистанционных измерений с помощью лазерных сканеров.

Измерение фактического износа футеровки шахты ДП № 5 с помощью сканера Leica RTC360

Наземные лазерные сканеры (НЛС) – это приборы, способные быстро получать плотные высококачественные трехмерные геометрические данные об окружающей среде. Они зарекомендовали себя как стандартный инструмент в многочисленных приложениях, например, моделирование по факту строительства, экологические и геологические науки, судебная экспертиза и инженерия. Из последних приложений фотограмметрия и геодезия являются инженерными областями с самыми высокими требованиями к точности, которые постоянно приводят к существенным улучшениям в этой измерительной технологии, делая ее конкурентоспособной даже в самых сложных измерительных задачах [7].

Сканирование было произведено 12.04.2024 г. в процессе выгребки печи с использованием сканера Leica RTC360. Измерения проводили с колошниковой площадки в трех точках и из выгребного проема на уровне литейного двора. Результаты сканирования представляют собой облако точек (117,5 млн). Для обработки точек использовалось программное обеспечение Leica TruView. В силу ограниченных возможностей прямой видимости всех участков внутренней поверхности печи присутствуют участки, частично не охваченные сканированием. Общий вид облака измеренных точек, представляющих собой внутреннюю поверхность ДП и расположение станций сканирования, показан на рис. 1. Проведены измерения фактических внутренних диаметров печи на различных горизонтах (отметки +43 900 мм, +41 350 мм, +40 500 мм, +39 500 мм, +38 500 мм, +37 500 мм, +36 500 мм, +35 500 мм,

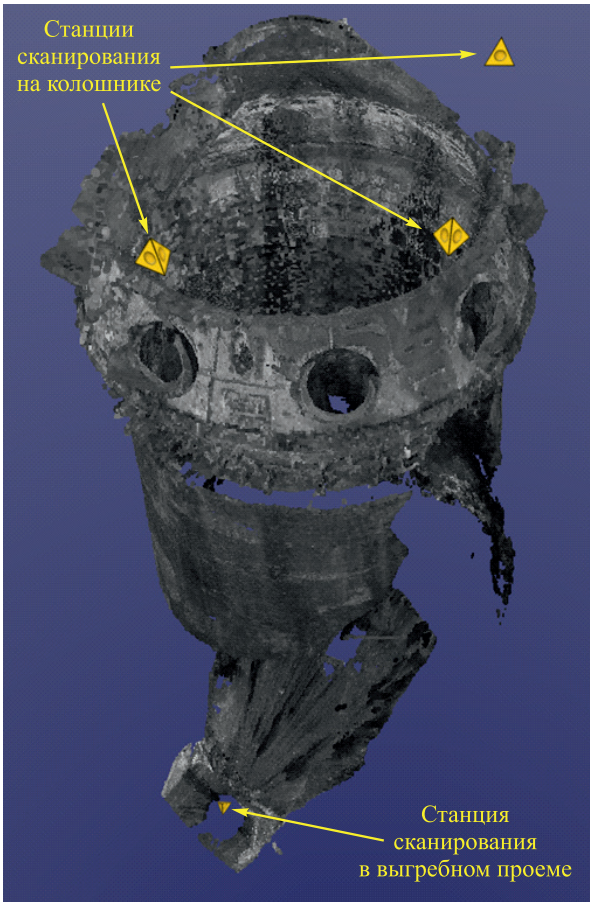

Рис. 1. Общий вид результатов сканирования внутреннего пространства ДП № 5 с указанием расположения станций сканирования

Fig. 1. General view of the scanning results of the internal space of blast furnace No. 5, showing the location of the scanning stations

Таблица 1. **Фактический износ огнеупорной футеровки шахты ДП № 5 по сечениям диаметрально противоположных леток**

Table 1. **Actual wear of the refractory lining in the shaft of blast furnace No. 5 by sections of diametrically opposite iron tapholes**

Отметка высотная, мм	Диаметр по чертежу, мм	Измерения по сечению диаметрально противоположных леток, мм				
		чугунные летки 1 – 3	чугунные летки 2 – 4	средний остаточный диаметр на высотной отметке	отклонение остаточного диаметра факт-чертеж	износ футеровки
+43 900	11 200	11 163	11 102	11 133	–68	–34
+43 000	11 200	11 278	11 252	11 265	65	32
+42 000	11 200	11 284	11 283	11 283	83	42
+41 350	11 239	11 790	12 065	11 928	689	344
+40 500	11 460	11 937	11 950	11 944	484	242
+40 000	11 590	11 975	11 996	11 986	396	198
+39 500	11 720	12 061	12 125	12 093	373	187
+39 000	11 850	12 300	12 338	12 319	469	235
+38 500	11 979	12 363	12 308	12 336	356	178
+38 000	12 109	12 529	12 548	12 539	429	215
+37 500	12 239	12 654	12 539	12 597	357	179
+37 000	12 369	12 620	12 700	12 660	291	146
+36 500	12 499	12 751	12 749	12 750	251	125
+36 000	12 629	12 902	12 896	12 899	270	135
+35 500	12 759	12 939	13 042	12 991	232	116
+35 000	12 889	13 225	13 172	13 198	310	155
+34 500	13 019	13 200	13 325	13 263	244	122
+34 000	13 149	13 331	13 333	13 332	183	92
+33 500	13 278	13 503	13 392	13 448	169	85
+33 000	13 408	13 640	13 628	13 634	226	113
+32 500	13 538	13 663	13 748	13 706	167	84
+32 000	13 668	13 897	13 889	13 893	225	112

+34 500 мм, +33 500 мм, +32 500 мм). Для этого выполнены горизонтальные сечения областей сканирования на соответствующих высотных отметках. Пример измерения диаметра на отметке +43 900 мм с привязкой к расположению чугунных леток представлен на рис. 2.

Дополнительно были построены ортогональные проекции срезов результатов сканирования с шагом 1 м и начальным смещением 0,5 м от вышеприведенных высотных отметок (от +43 000 мм до +32 000 мм включительно), что позволило построить карту фактического износа огнеупорной футеровки шахты ДП № 5, представленную в табл. 1.

Отрицательное значение износа футеровки на высотной отметке +43 900 мм объясняется изменением положения (сдвигом) сегментов колошниковой защиты в результате длительной эксплуатации. Графически изменение величины износа огнеупорной футеровки в зависимости от высотной отметки шахты доменной печи представлено на рис. 3.

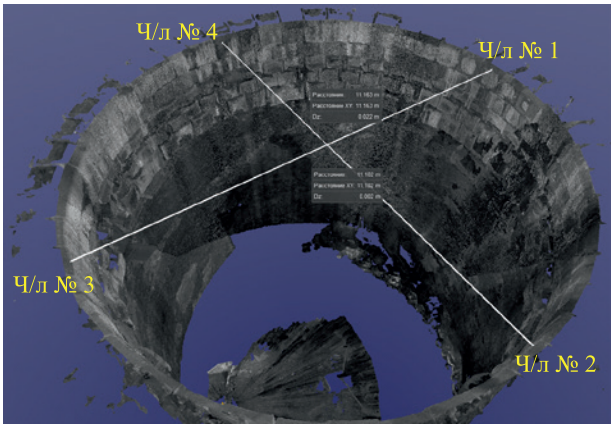

Рис. 2. Пример измерения диаметра внутреннего пространства ДП № 5 на отметке +43 900 мм (колошниковая защита) с привязкой к расположению чугунных леток

Fig. 2. Example of measuring the diameter of the internal space of blast furnace No. 5 at +43,900 mm (throat armour) with reference to the location of iron tapholes

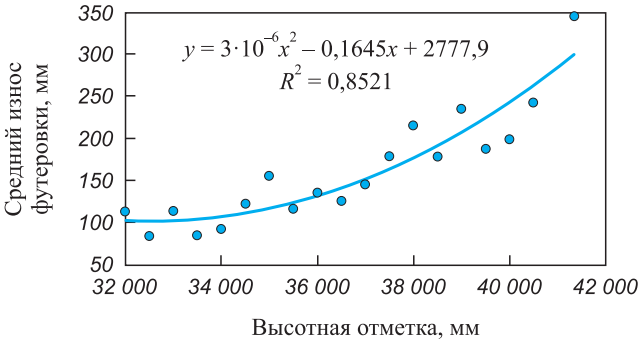

Рис. 3. Изменение фактической величины износа огнеупорной футеровки (неохлаждаемая часть) в зависимости от высотной отметки шахты ДП № 5 по результатам кампании 2006 – 2024 гг.

Fig. 3. Variations in the actual wear of the refractory lining (uncooled section) based on the height of blast furnace shaft No. 5, according to the results of the 2006 – 2024 campaign

Таким образом, максимальный износ огнеупорной футеровки верхней неохлаждаемой части шахты ДП № 5 в кампании 2006 – 2024 гг. наблюдается в верхних рядах огнеупоров, непосредственно под сегментами колошниковой защиты и составляет 242 – 344 мм или 37,4 % первоначальной толщины футеровки. На более глубоких горизонтах, до – 10,0 м от уровня засыпи шихты, износ футеровки не превышает 100 – 150 мм или 11 – 16 % первоначальной толщины. По результатам предыдущей кампании печи 1996 – 2006 гг. фиксировалось значительное уменьшение толщины футеровки шахты – верхние ряды имели остаточную толщину 270 – 300 мм, а износ неохлаждаемой части шахты достигал 67 %, т. е. был в 1,8 раза больше, чем в текущей кампании.

Состояние охлаждаемой части шахты ДП № 5 по результатам текущей кампании представлено на рис. 4. Пунктирной линией ($A – B$) обозначена граница неохлаждаемой части шахты, ниже которой располагается комбинированная система охлаждения, состоящая из чередующихся рядов плитовых и горизонтальных холодильников. Ломаная линия ($C – D – E – F$ ... $– K$) обозначает по вертикали скрытые под футеровкой ряды холодильников шахты печи, при этом отрезки $C – D$, $E – F$ и т. д. соответствуют пространству, занятому рядами плитовых холодильников. Из рис. 4 следует, что футеровка в охлаждаемой части сохранилась по высоте от четырех до шести рядов плитовых холодильников. Достаточно интенсивный износ шахты зафиксирован на уровне ниже третьего от верха охлаждаемой части ряда плитовых холодильников или ниже отметки +30 500 мм. Износ составляет от 340 (по чертежу от исходной футеровки до рыльной части горизонтального холодильника шахты) до 510 мм (износ по результату 3D сканирования) в районах плитовых холодильников.

Следует отметить относительно удовлетворительное состояние элементов системы охлаждения шахты печи в текущей кампании. Четыре верхних ряда плитовых холодильников и до восьми верхних рядов горизонтальных холодильников по-прежнему защищены огнеупорной футеровкой. Расположенные ниже холодильники в достаточной мере сохранили свою работоспособность. Всего в текущей кампании было повреждено 146 шт. плитовых, 262 шт. горизонтальных холодильников шахты и 1 шт. холодильников заплечиков или 23,2, 45,2 и 0,01 % общего количества холодильников данных видов соответственно. Общее количество поврежденных горизонтальных, плитовых холодильников шахты и холодильников заплечиков в предыдущей компании 1995 – 2006 гг. составило 9 шт. плитовых, 221 шт. горизонтальных и 25 шт. заплечиков, или 1,4, 38,1 и 20,8 % общего количества холодильников данных видов соответственно. Производство чугуна ДП № 5 составило 75,18 млн т в текущей и 39,48 млн т в предыдущей кампаниях, а общее количество поврежденных элементов системы охлаждения печи выше фурм – 409 и 255 шт. соответственно. Таким образом, на один поврежденный элемент системы охлаждения заплечиков и шахты печи в текущей кампании выплавлено 183,8 тыс. т чугуна, что на 19 % превышает данный показатель в предыдущей кампании, составлявший 154,8 тыс. т чугуна.

Сравнение результатов предыдущей и текущей кампании печи позволяет сделать вывод о высокой эффективности применявшихся мероприятий по защите огнеупорной футеровки и элементов системы охлаждения заплечиков и шахты, включавших в себя:

– применение ранее разработанного способа обеспечения самообновления защитного гарнисажа в шахте ДП [8], включающий циклическую загрузку шихтовых

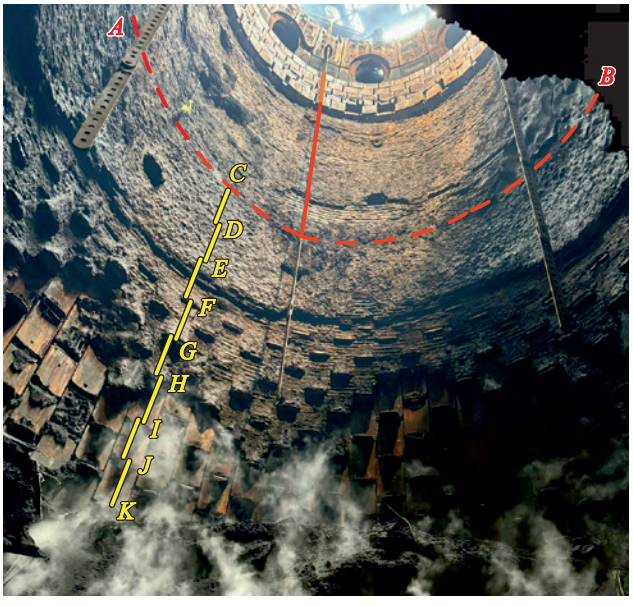

Рис. 4. Состояние огнеупорной футеровки в шахте ДП № 5 по результатам кампании 2006 – 2024 гг., охлаждаемая часть

Fig. 4. Condition of the refractory lining in the cooled section of blast furnace shaft No. 5, based on the results of the 2006 – 2024 campaign

материалов, в том числе гарнисажеобразующей смеси, состоящей из железной руды и агломерата, которая позволяет получать из нее первичный шлаковый расплав в количестве 20 – 25 % и с долей закиси железа в данном расплаве не более 15 %;

– разработку и применение в текущей кампании способов эффективного распределения различных видов твердого топлива по сечению печи, системы распределения шихтовых материалов, которая включает заданное распределение рудной нагрузки по сечению ДП, а также цикличное использование осевых, предпромывочных и промывочных порций, обеспечивающих центральный ход ДП в переменных шихтовых и газодутьевых условиях [6].

Необходимо отметить, что изучение состояния футеровки шахты ДП № 5 производилось в максимально сжатые сроки. Общее время сканирования на четырех станциях составило 50 мин, что позволило не замедлять темп работ, связанных с проведением ремонта печи.

Замер толщин огнеупорной футеровки в районе фурменного пояса и в горне ДП № 5

Замер толщин огнеупорной футеровки в районе горна и лещади производился в период выгребки остатков шихтовых материалов из рабочего пространства ДП № 5. Для исключения нахождения людей в опасной зоне применяли метод дистанционного измерения, фиксируя фотографическое изображение элементов огнеупорной футеровки и сопоставляя в масштабе линейные размеры данных элементов с известными размерами конструкции печи, не подвергающихся изменениям в процессе эксплуатации (толщины кожуха, плитовых холодильников горна и лещади и т. д.). Данный способ позволяет не только выполнить замеры безопасно, но и существенно сократить время исследования, так как фотографическая фиксация происходит быстро в технологических паузах процесса выгребки, а математическая обработка результатов возможна в любой доступный момент. В данном исследовании процедура сравнения размеров объектов путем измерения длин зафиксированных на фотографии линий производилась в цифровом инструменте Visio. Известным линейным размером принималась толщина горнового холодильника, равная 160 мм.

Выгребка остатков шихтовых материалов производилась через два выгребных проема, оборудованных в кожухе печи на уровне фурменного пояса (верхний) и лещади (нижний). Карта расположения выгребных проемов в горизонтальном сечении горна ДП № 5 с привязкой к основным элементам конструкции представлена на рис. 5.

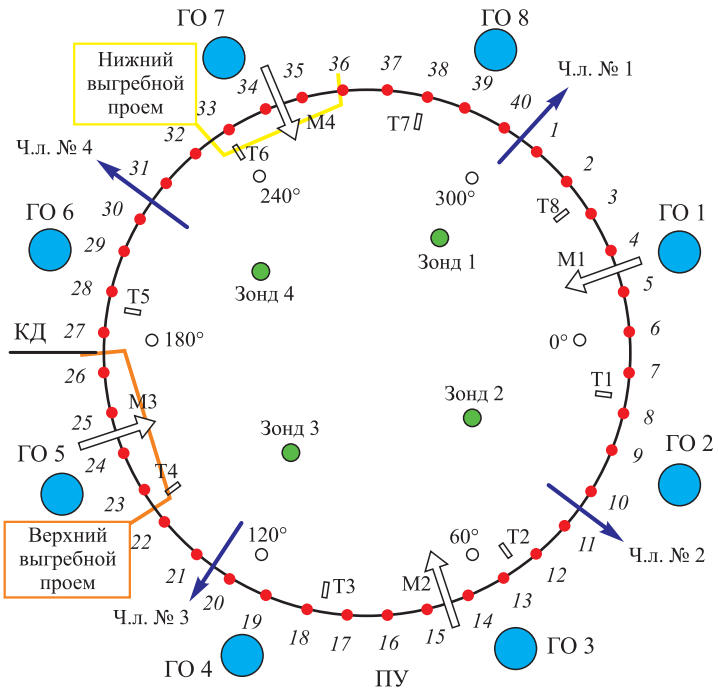

Рис. 5. Карта расположения выгребных проемов в горизонтальном сечении горна ДП № 5:
КД – конвейер доменный; ПУ – расположение пылеуловителя; ГО 1, ГО 2, …ГО 8 – проекции расположения газоотводов;
Т1, Т2, …Т16 – проекции расположения термопар измерения температуры периферийных газов;
Ч.л. № 1, Ч.л. № 2, …Ч.л. № 4 – расположение чугунных леток

Fig. 5. Map showing the location of cesspools in the horizontal section of the hearth of blast furnace No. 5:
КД – blast furnace pipeline; ПУ – dust collector; ГО 1, ГО 2, …ГО 8 – projection of the gas uptakes locations;
Т1, Т2, … Т16 – projection of the of thermocouple locations for measuring peripheral gas temperatures;
Ч.л. № 1, Ч.л. № 2, … Ч.л. № 4 – location of the iron tapholes

Фурмы расположены по окружности через 360/40 = 9°. Правая часть нижнего выгребного проема, где производились замеры остаточной толщины углеродистых блоков, расположена левее на 17,15° от оси чугунной летки № 4, что соответствует району между воздушными фурмами *32* и *33* (9/2 + 9 = 13,5° и 9/2 + 9 + 9 = 22,5° соответственно). Левая часть нижнего выгребного проема, где производились замеры остаточной толщины углеродистых блоков, расположена левее на 31,7 + 17,15 = 48,85° от оси чугунной летки № 4, что соответствует району воздушной фурмы *36* (9/2 + 9·5 = 49,5°).

Правая часть верхнего выгребного проема расположена левее на 18,15° от оси чугунной летки № 3, что соответствует району между воздушными фурмами *22* и *23* (9/2 + 9 = 13,5° и 9/2 + 9 + 9 = 22,5° соответственно). Левая часть верхнего выгребного проема расположена левее на 35,7 + 18,15 = 53,85° от оси чугунной летки № 3, что соответствует району между воздушными фурмами *26* и *27* (9/2 + 9·5 = 49,5° и 9/2 + 9·6 = 58,5° соответственно).

Пример использования инструмента Visio для измерения остаточной толщины углеродистых огнеупорных блоков в правой части нижнего выгребного проема (между воздушными фурмами *32* и *33*) представлен на рис. 6. В данном примере с учетом масштаба фактический остаточный размер блока составляет

$$89{,}8888 \cdot 160 / 7{,}4677 = 1926 \text{ мм},$$

где 89,8888 – размер блока на фотографии, мм; 160 – толщина холодильника по чертежу, мм; 7,4677 – толщина холодильника на фотографии, мм.

Результаты расчета остаточной толщины углеродистого блока хорошо согласуются с контрольным измерением, выполненным в период технологического перерыва процесса выгребки. Таким же способом была проведена оценка остаточной толщины огнеупоров по высоте нижнего и верхнего выгребных проемов.

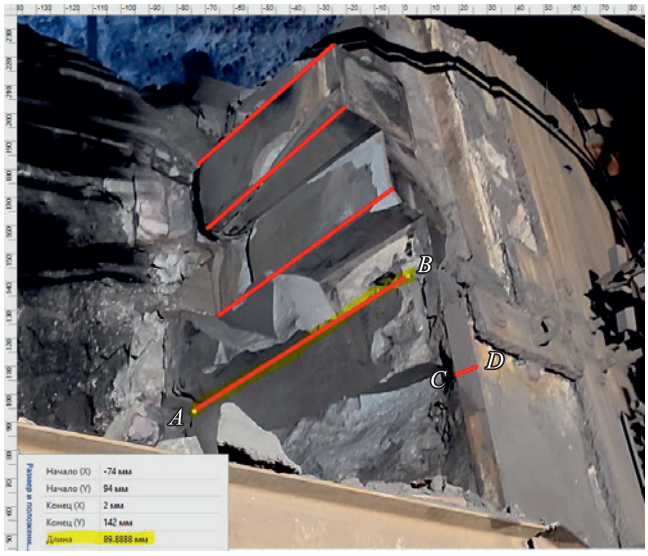

Рис. 6. Пример применения инструмента Visio для определения остаточного линейного размера углеродистого огнеупорного блока (отрезок *A – B*) способом масштабирования известной толщины горнового холодильника (отрезок *C – D*)

Fig. 6. Example of using the Visio tool to determine the residual linear size of a carbon refractory block (segment *A – B*) by scaling the known thickness of a cast iron stave (segment *C – D*)

Выполненные измерения позволили сформировать карту фактического разгара углеродистых блоков в районе нижнего выгребного проема между воздушными фурмами *32* и *36*, представленную в табл. 2.

Таким же способом, как при замере фактического износа углеродистых блоков в районе нижнего выгребного проема, был проведен замер остаточной толщины огнеупорной футеровки горна в районе верхнего выгребного проема. Это позволило сформировать линии разгара футеровки лещади и горна ДП № 5 по вертикальным сечениям в районе воздушных фурм *22*, *26* и *32*, *36* соответственно. Графическое изображение данных линий в сравнении с результатами ультразвукового зондирования эхо-методом (AU-E) представлены на рис. 7.

Таблица 2. **Фактический износ углеродистых огнеупорных блоков горна ДП № 5 в районе нижнего выгребного проема между воздушными фурмами *32* и *36***

Table 2. **Actual wear of the carbon refractory blocks in the hearth of blast furnace No. 5 in the lower cesspool area between tuyeres *32* and *36***

Исходная длина блока по чертежу, мм	Блок слева от проема (район в/ф *36*)		Блок справа от проема (район в/ф *32*)		Средняя величина по ширине проема	
	остаточная толщина (по нижней грани блока), мм	разгар, мм	остаточная толщина (по верхней грани блока), мм	разгар, мм	остаточная толщина, мм	разгар, мм
1500	1267	233	1353	147	1310	190
1650	1337	313	1383	267	1360	290
1800	1521	279	1627	173	1574	226
1950	1870	80	1926	24	1898	52

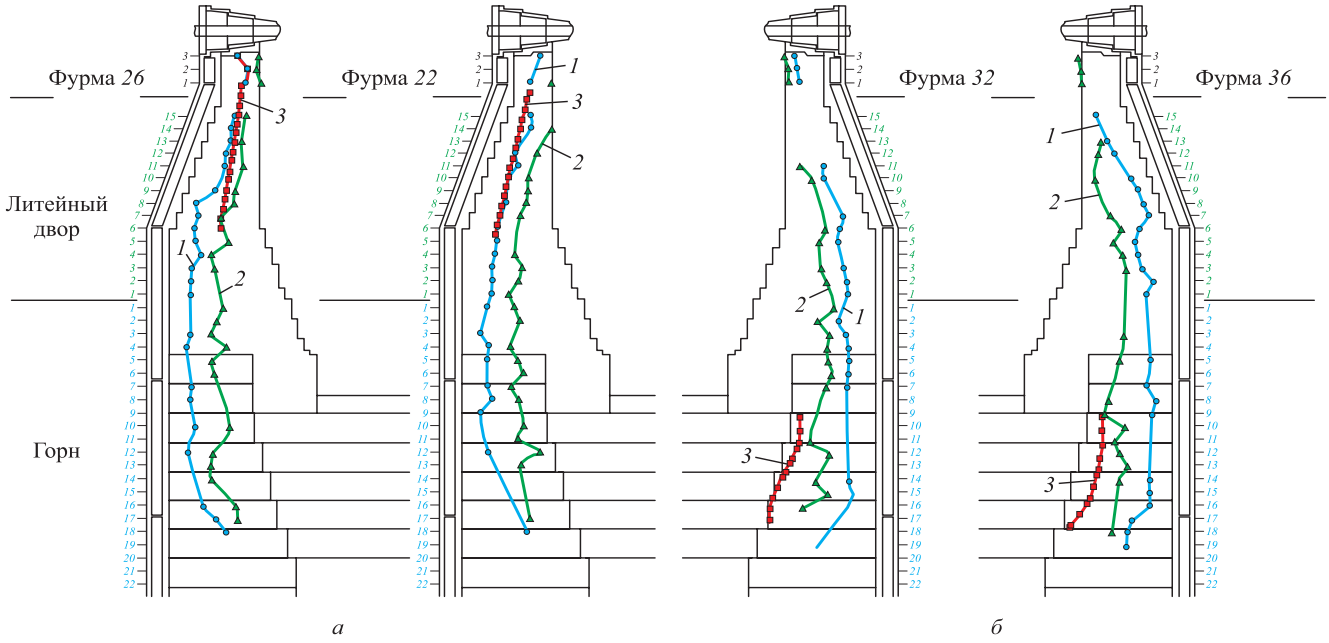

Рис. 7. Графическое изображение линий фактического разгара огнеупорной футеровки горна и лещади в сравнении с данными ультразвукового зондирования методом AU-E в районах верхнего (*а*) и нижнего (*б*) выгребных проемов:
1 – толщина обнаруженной методом AU-E остаточной футеровки;
2 – толщина обнаруженной методом AU-E измененной футеровки/гарнисажа;
3 – фактическая линия разгара огнеупорной футеровки, обнаруженная при проведении капитального ремонта

Fig. 7. Graphical representation of the actual erosion of the refractory lining in the hearth and bottom areas, compared with the ultrasonic echo-sounding data (AU-E) in the regions of the upper (*a*) and lower (*б*) cesspools:
1 – thickness of the residual lining detected by the echo method (AU-E);
2 – thickness of the modified lining/scull detected by the echo method (AU-E);
3 – actual erosion line of the refractory lining, discovered during major repairs

Метод AU-E является технологией распространения волн напряжения с использованием анализа данных во временном и частотном домене для определения толщины футеровки или для обнаружения аномалий, таких как трещины, пустоты или проникновение металла в футеровку [9 – 11]. Во время измерений механический удар по поверхности конструкции (молотком или ударно-механическим источником) образует импульс напряжения, который распространяется в слои футеровки. Волна частично отражается в результате изменений свойств слоя футеровки, но основная волновая энергия распространяется в слоях сплошной футеровки до полного рассеивания энергии. Волны сжатия поступают на датчики/принимающие устройства, и сигналы анализируются для качественной оценки футеровки. На волновую скорость сигнала влияние оказывают плотность, градиент температуры, фактор геометрической формы и свойства упругости. Резкое изменение плотности и/или свойств упругости материала приводит к частичному или полному отражению волны. Таким образом, сигналы отражаются границами раздела, такими как футеровка – расплав металла и поверхностями раздела между футеровочными блоками. Кроме того, зоны, свободные от напряжений, такие как трещины и пустоты, также приводят к частичному или полному отражению сигналов. Необходимо отметить, что при выполнении ультразвукового зондирования методом AU-E специалистами компании HATCH делались существенные оговорки, в частности:

– с использованием метода AU-E можно определить только те трещины, которые идут параллельно кожуху печи (т. е. перпендикулярно направлению сигнала от удара). Любые трещины или расслоения, параллельные направлению сигнала от удара (т. е. внутрь к центру печи), определить невозможно;

– устойчивая футеровка означает неизмененную футеровку, находящуюся в состоянии, почти как после изготовления. Тогда как измененная футеровка, вероятно, подверглась существенным изменениям или растрескалась.

Сравнивая представленные на рис. 7 изображения линий фактического разгара футеровки с результатами ультразвукового зондирования методом AU-E, можно сделать следующие выводы:

– в верхней части горна, футерованной огнеупорным кирпичом с содержанием Al_2O_3 = 43 %, эхо-метод показывает удовлетворительную точность, фактические замеры минимальной остаточной толщины футеровки дают величину 220 – 330 мм (без гарнисажа), что соответствует результатам ультразвукового зондирования;

– в нижней части горна и лещади, футерованных углеродистыми блоками, результаты замеров специа-

листов HATCH показали крайне низкие значения остаточной толщины футеровки (среднее значение по окружности и высоте горна 540 мм или 21 % первоначальной величины, минимальное значение 240 мм или 10 % исходной величины). Даже с учетом оговорок и представленной в отчетах линии «измененной футеровки с учетом гарнисажа», фактическая остаточная толщина углеродистых блоков, замеренная во время ремонта, превышала 80 %, т. е. была кратно выше.

Данные табл. 2 и рис. 7 позволяют произвести оценку результативности мероприятий, выполнявшихся в текущей кампании ДП № 5 для обеспечения сохранности огнеупорной футеровки горна и лещади. Известно, что факторами, определяющими износ огнеупорной футеровки, являются:

– абразивное действие потоков жидкого чугуна;

– химическое воздействие чугуна и шлака;

– инфильтрация и термомеханическое напряжение в футеровке [12 – 14]. При этом общепризнано, что срок службы футеровки горна в значительной степени определяется качеством загружаемого кокса, а износостойких конструкций горна в настоящее время не существует [15].

В первую очередь в текущей кампании были разработаны и применялись на постоянной основе мероприятия, предотвращающие развитие абразивного

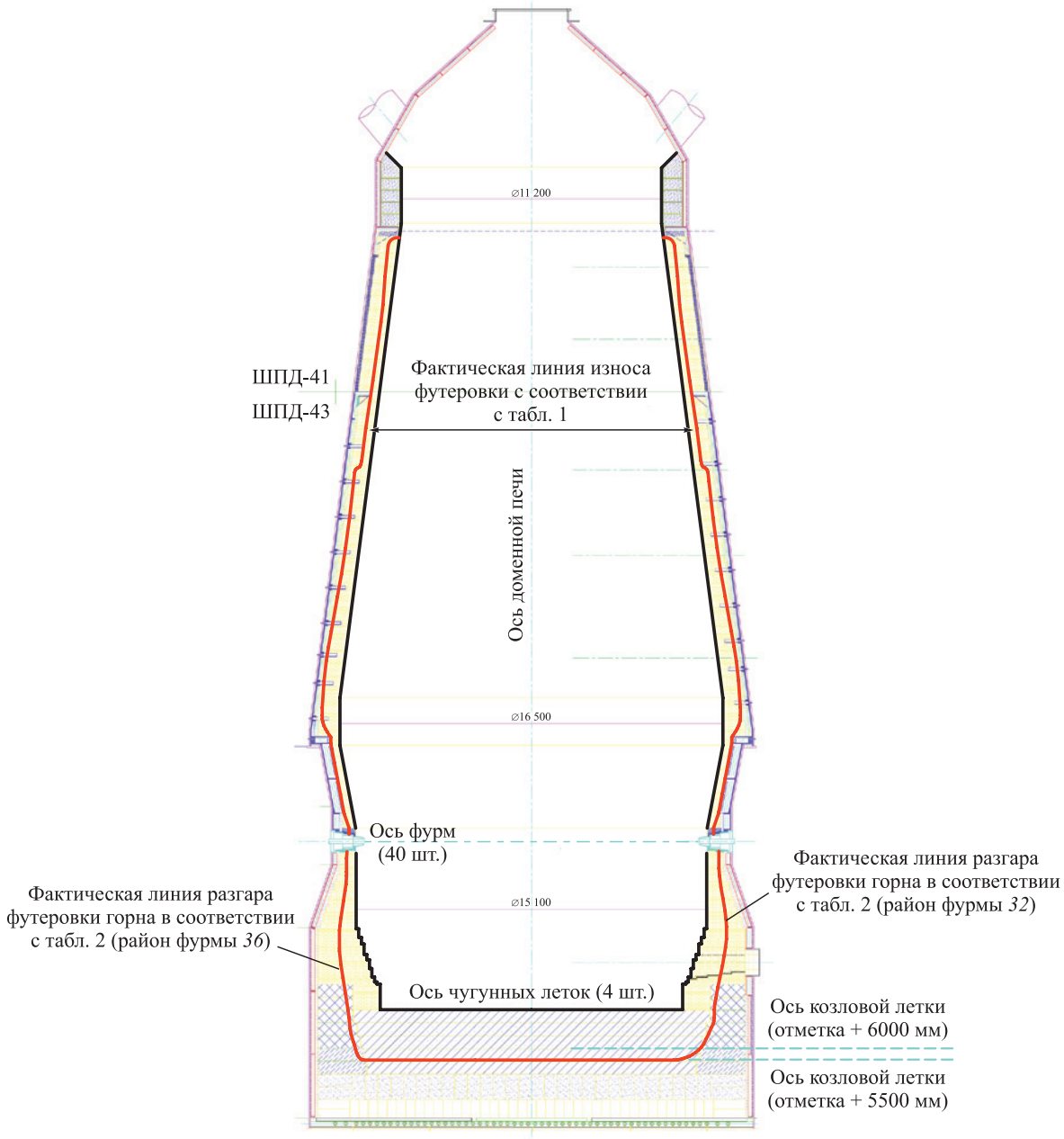

Рис. 8. Карта фактического разгара футеровки ДП № 5 по завершению кампании 2006 – 2024 гг.

Fig. 8. Map of the actual erosion of the refractory lining of blast furnace No. 5 at the end of the 2006 – 2024 campaign

действия потоков жидкого чугуна в пристеночной зоне, т. е. обеспечивающие интенсивную фильтрацию жидких продуктов плавки через тотерман, а также хорошую газопроницаемость в центральной зоне печи. В реальных условиях эксплуатации ДП за счет колебания горячей прочности (CSR) кокса, попадания в горн воды из дефектных элементов системы охлаждения, поступления в горн локализованных масс тугоплавких составляющих доменной шихты, порозность тотермана может значительно снижаться. На постоянной основе был организован контроль проницаемости центральной зоны печи с помощью зондирования тотермана. Для очистки горна от тугоплавких флюсовых остатков и мелких фракций кокса введены комплексные промывки объема горна ДП. Для снижения химической эрозии углеродистых блоков горна и лещади из-за неравновесных химических составов чугуна разработан способ управления технологическим процессом через мониторинг отношения фактического содержания углерода в чугуне $C_ф$ к насыщенному содержанию $C_н$ путем регулирования расхода природного газа, вдуваемого в печь.

Сопоставляя результаты предыдущей кампании ДП № 5 (по ее завершению в 2006 г. в районе чугунных леток толщина огнеупора не превышала 200 – 250 мм, углеродистые периферийные блоки верхней лещади, находящиеся непосредственно под летками, были деформированы с образованием трещин и сколов в отдельных местах) с данными табл. 2, можно сделать вывод о высокой результативности применявшихся в текущей кампании мер, повышающих стойкость углеродистой футеровки горна и лещади.

В качестве численной оценки эффективности мероприятий продления кампании ДП № 5, в текущей кампании можно предложить суммарное производство чугуна, отнесенное к площади горна, которое составило 420,0 тыс. т/м^2 и превысило показатель предыдущей кампании 220,6 тыс. т/м^2 в 1,9 раза или на 90,4 %.

Вместе с тем, результаты проведенных исследований остаточной толщины футеровки позволяют определить зону в районе фурменного пояса, как требующую разработки дополнительных мероприятий по защите в следующей кампании печи.

Карта фактического разгара футеровки ДП № 5

По результатам выполненного исследования рабочего пространства ДП № 5 сформирована комплексная карта фактического разгара футеровки в период кампании 2006 – 2024 гг., представленная на рис. 8.

Выводы

В результате комплексных исследований, проведенных во время капитального ремонта I разряда ДП № 5, подтверждена эффективность разработанных и применявшихся в текущей кампании мероприятий по защите огнеупорной футеровки шахты, горна и металлоприемника ДП, позволивших увеличить срок службы агрегата в 1,75 раза и добиться его высокоэффективной работы в течение всей кампании 2006 – 2024 гг.

С помощью дистанционных измерений, включающих метод 3D лазерного сканирования, определен фактический профиль разгара огнеупорной футеровки ДП № 5 и выявлены зоны (повышенного разгара) низкой остаточной толщины футеровки по высоте ДП.

Анализ фактических остаточных толщин огнеупорной футеровки в горне ДП № 5 показал удовлетворительную точность ультразвукового зондирования методом AU-E в области глиноземистой огнеупорной футеровки фурменного пояса и недостаточную точность при замерах углеродистых блоков.

Список литературы / References

1. Курунов И.Ф., Логинов В.Н., Тихонов Д.Н. Методы продления кампании доменной печи. *Металлург*. 2006;(12):34–39.

   Kurunov I.F., Loginov V.N., Tikhonov D.N. Methods of extending a blast-furnace campaign. *Metallurgist*. 2006;50:605–613. https://doi.org/10.1007/s11015-006-0131-5
2. Vinogradov E., Karimov M., Dmitriev A., etc. Blast furnace campaign extension at CherMK, Severstal. In: *AISTech 2018 Proceedings – Iron and Steel Technology Conference and Exposition*. 2018:551–560.
3. Можаренко Н.М., Канаев В.В., Панчоха Г.В. Влияние технологии плавки на футеровку металлоприемника доменных печей. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2003;(5):5–8.

   Mozharenko N.M., Kanaev V.V., Panchokha G.V. Influence of smelting technology on metal receiver lining of blast furnace. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2003;(5):5–8. (In Russ.).
4. Влияние производительности доменной печи на продолжительность ее кампании. *Новости черной металлургии за рубежом*. 2005;(1):21–24.

   The influence of blast furnace productivity on the duration of its campaign. *Novosti chernoi metallurgii za rubezhom*. 2005;(1):21–24. (In Russ.).
5. Шульте М., Клима Р., Рингель Д., Фосс М. Контроль износа горна доменной печи с помощью датчиков теплового потока. *Черные металлы*. 1998;(4):17–22.

   Shul'te M., Klima R., Ringel' D., Foss M. Monitoring the wear of the blast furnace hearth using heat flow sensors. *Chernye metally*. 1998;(4):17–22. (In Russ.).
6. Калько А.А., Виноградов Е.Н., Калько О.А., Калько А.А. Разработка и внедрение технологических мероприятий по продлению кампании доменной печи № 5 ПАО «Северсталь». *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(3):260–269. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-3-260-269

Kal'ko A.A., Vinogradov E.N., Kal'ko O.A., Kal'ko A.A. Development and implementation of technological measures to extend the campaign of blast furnace No. 5 of PJSC Severstal. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(3): 260–269. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-3-260-269

7. Medic M.Sc.T. Efficient calibration strategies for panoramic terrestrial laser scanners. Dissertation Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.–Ing.). Bonn: Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn; 2021.
8. Пат. 2251575 RU. Способ создания защитного гарнисажа в шахте доменной печи / Логинов В.Н., Суханов М.Ю., Гуркин М.А., Васильев Л.Е., Каримов М.М., Большаков В.И., Нестеров А.С., Можаренко Н.М., Якушев В.С.; заявлено 21.04.2004; опубликовано 10.05.2005. Бюллетень № 13.
9. Gebski P., Sadri A., Ying W. Development of the system for furnace integrity monitoring based on real-time continuous acoustic emission data acquisition and analysis. In: *Conf. of Metallurgists (COM), October 2–5, 2011, Montreal, Canada*, 2011.
10. Vinogradov E., Kalko A., Chikinov S., Ivashov A., Balahonov D., Gurkin M., Karunova E., Gordon Y., Sadri A., Busser J. Development of strategy for sustaining, enhancement and cost reduction at Severstal's primary end. In: *Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference. Association for Iron and Steel Technology*; 2020:178–186.
11. Vinogradov E., Karimov M., Dmitriev A. Careful control of refractory lining conditions to ensures prolonged campaign of blast furnace. In: *7th ECIC Proceedings, Linz, Austria*, 2016.
12. Каплун Л.И., Малыгин А.В., Онорин О.П., Пархачев А.В. Устройство и проектирование доменных печей: Учебное пособие. Екатеринбург: УрФУ; 2016:217.
13. Близнюков А.С., Фещенко С.А., Курунов И.Ф. и др. Исследование футеровки горна доменной печи. Сообщение 1. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2010;(9):31–36.

    Bliznyukov A.S., Feshchenko S.A., Kurunov I.F., etc. Study of the blast furnace hearth lining. Message 1. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2010;(9):31–36. (In Russ.).
14. Большаков В.И., Гладков Н.А., Муравьева И.Г. и др. Структура нижней части столба шихты и роль ее элементов в организации процессов плавки. *В сборнике научных трудов ИЧМ: Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2004;(8):12–119.
15. Ковальски В., Люнген Х.Б., Штриккер К.П. Стойкость доменных печей: современный уровень, развитие и мероприятия по развитию компании. *Черные металлы*. 1999;(9):26–35.

    Koval'ski V., Lyungen Kh.B., Shtrikker K.P. Durability of blast furnaces: Current level, development and company development measures. *Chernye metally*. 1999;(9):26–35. (In Russ.).

Сведения об авторах / Information about the Authors

Андрей Александрович Калько, *руководитель Центра технологического развития Upstream*, ПАО «Северсталь» Череповецкий металлургический комбинат
E-mail: aakalko@severstal.com

Andrei A. Kal'ko, *Head of Technological Development Center Upstream,* PJSC Severstal, Cherepovets Steel Mill
E-mail: aakalko@severstal.com

Леопольд Игоревич Леонтьев, *академик, советник,* Президиум РАН; *советник генерального директора*, Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина
ORCID: 0000-0002-4343-914X
E-mail: leo@presidium.ras.ru

Leopol'd I. Leont'ev, *Academician, Adviser*, Russian Academy of Sciences; *Advisor to the General Director*, I.P. Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy
ORCID: 0000-0002-4343-914X
E-mail: leo@presidium.ras.ru

Евгений Александрович Волков, *ведущий эксперт Центра технологического развития Upstream*, ПАО «Северсталь» Череповецкий металлургический комбинат
E-mail: eavolkov@severstal.com

Evgenii A. Volkov, *Leading Expert of Technological Development Center Upstream*, PJSC Severstal, Cherepovets Steel Mill
E-mail: eavolkov@severstal.com

Вклад авторов / Contribution of the Authors

А. А. Калько – анализ результатов измерений остаточных толщин футеровки доменной печи, определение проблемных зон, анализ эффективности мероприятий для повышения стойкости футеровки горна доменной печи и организации эффективной структуры столба шихты в доменной печи.
Л. И. Леонтьев – постановка задачи исследования, анализ результатов, формирование выводов по работе.
Е. А. Волков – анализ результатов измерений остаточных толщин футеровки доменной печи, сравнительные расчеты остаточных толщин футеровки различными методами.

A. A. Kal'ko – analysis of the results of measuring residual thickness of blast furnace lining, identification of problem areas, analysis of effectiveness of measures to increase the durability of blast furnace hearth lining and organization of an effective structure of the charge column in blast furnace.
L. I. Leont'ev – setting the research task, analysis of results, drawing conclusions on the work.
E. A. Volkov – analysis of the results of measuring residual thickness of blast furnace lining, conducting comparative calculations of lining residual thicknesses by various methods.

Поступила в редакцию 26.08.2024
После доработки 28.09.2024
Принята к публикации 30.09.2024

Received 26.08.2024
Revised 28.09.2024
Accepted 30.09.2024