ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ГАРНИСАЖА ГОРНА ДП № 6 НЛМК

Сообщение 1

И. Ф. КУРУНОВ¹, *д-р техн. наук; А. С. БЛИЗНЮКОВ², *канд. техн. наук, технический директор, a.s.bliznjukov@mail.ru; В. Н. ТИТОВ^{1,3}, *канд. техн. наук, доцент, главный специалист Управления развития технологии; Н. В. ЛОГВИНОВ¹, *начальник участка доменных печей ДЦ № 2; Д. Н. ТИХОНОВ⁴, *канд. техн. наук, директор; М. Р. САДРАДИНОВ², *директор; А. Р. МАКАВЕЦКАС⁵, *ведущий инженер Центра ресурсосберегающих технологий переработки минерального сырья; Ю. Ю. ФИЩЕНКО⁵, *инженер I категории Центра ресурсосберегающих технологий переработки минерального сырья*
(¹ ПАО НЛМК, Россия, г. Липецк; ² ООО ТД “Карбон-Шунгит Трейд”, Россия, г. Екатеринбург; ³ Липецкий государственный технический университет, Россия, г. Липецк; ⁴ DDG Technologies, LLC, Россия, г. Москва; ⁵ Национальный исследовательский технический университет “МИСиС”, Россия, г. Москва)*******

Аннотация. Анализ опыта эксплуатации доменных печей Японии, Европы и Северной Америки свидетельствует о том, что продолжительность их кампании в значительной мере определяется стойкостью футеровки горна и лещади. Исследование изменения структуры гарнисажа и футеровки стен горна и лещади при различных составах шихты и условиях доменной плавки позволит разработать организационные и технические решения для повышения эффективности доменного производства. Проведено исследование состава гарнисажа горна на уровне и ниже чугунной летки на ДП № 6 ПАО НЛМК после остановки на капитальный ремонт 2-го разряда с 26.08.2016 г. по 29.09.2016 г. Изучен состав и структура гарнисажа, образовавшегося на стенках горна ниже уровня чугунной летки. Отбирались штучные образцы проб массой от 10 до 70 кг при тщательном визуальном осмотре для исключения отбора окисленных и гидратированных образцов. Установлено, что основу гарнисажа, по данным визуального осмотра проб, а также петрографического, химического, рентгеноструктурного, микрозондового анализов, составляют продукты, образовавшиеся при кристаллизации продуктов плавки: металл, в составе которого преобладает магнитная составляющая (α -железо) с включениями карбида железа и графита; графит в виде отдельной фазы; шлаковые составляющие, в основе которых меллилит на уровне чугунной летки и силикаты (рентгеноаморфные) переменного состава системы $\text{CaO}-\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$. Количество металла и графита в гарнисаже стен горна возрастает от чугунной летки к лещади и достигает значения $>85\%$ на уровне на 300 мм ниже чугунной летки. Содержание во всех пробах соединений титана в оксидной форме, а также нитридов, карбонитридов суммарно не достигает 1–2 %.

Ключевые слова: доменная печь, чугунная летка, футеровка и гарнисаж горна, состав и структура гарнисажа, карбид железа, графит, шлаковые составляющие гарнисажа.

Ссылка для цитирования. [Курунов И.Ф., Близнюков А.С., Титов В.Н., Логвинов Н.В., Тихонов Д.Н., Садрадинов М.Р., Макавецкас А.Р., Фищенко Ю.Ю. Исследование состава и структуры гарнисажа горна ДП № 6 НЛМК (Сообщение 1) // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 2. С. 166–181.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-2-166-181

STUDY OF COMPOSITION AND STRUCTURE OF NLМК BF No. 6 HEARTH SCULL Report 1

I. F. KURUNOV¹, *HD (Tech); A. S. BLIZNYUKOV², *PhD (Tech), Technical director, a.s.bliznjukov@mail.ru; V. N. TITOV^{1,3}, *PhD (Tech), Prof. Ass., Chief specialist, Dpt. of technologies development; N. V. LOGVINOV¹, *Head of BF Dpt, BF shop No. 2; D. N. TIKHONOV⁴, *PhD (Tech), director; M. R. SADRADINOV², *director; A. R. MAKAVETSKAS⁵, *Leading engineer, Center of resources saving technologies of mineral raw materials processing; YU. YU. FISCHENKO⁵, *engineer of 1st category, Center of resources saving technologies of mineral raw materials processing*
(¹ PAO NLМК, Russia, Lipetsk; ² OJSC TD “Karbon-Shungit Trade”, Russia, Ekaterinburg; ³ Lipetsk State Technical University, Russia, Lipetsk; ⁴ DDG Technologies, LLC, Russia, Moscow; ⁵ National Research Technical University MISiS, Russia, Moscow)*******

Abstract. Analysis of blast furnaces running experience in Japan, Europe and North America shows, that duration of their operating period determines to a great extent by hearth and bottom lining endurance. Study of structure change of scull and hearth walls and bottom lining at different burden compositions and BF heat conditions will enable to elaborate organization and technical solutions for BF efficiency increasing. Study of hearth scull composition at the level of iron notch and lower at PAO NLMK BF No. 6 after 2nd category overhaul stoppage from 26.08.2016 through 29.09.2016. Lump samples of mass from 10 up to 70 kg were taken with careful visual inspection to exclude oxidized and hydrated pieces. Based on visual inspection of samples as well as petrographic, chemical, X-ray structural and microprobe analysis it was determined, that the scull base comprises products formed during crystallization of heat products. They included a metal, in which a magnetic part (α -iron) is prevailed with iron carbide and graphite inclusions, graphite as a separate phase, slag components with a base of melilite at the level of iron notch and silicates (X-ray amorphous) of variable content of $\text{CaO-K}_2\text{O-Na}_2\text{O-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ system. The quantity of metal and graphite in the hearth walls scull increases from iron notch to the bottom and reaches a value $>85\%$ at the level 300 mm lower than iron notch. Content of titanium compounds in oxide form in all the samples as well as nitrides, carbo-nitrides totally does not exceeds 1–2%.

Key words: blast furnace, iron notch, hearth lining and scull, scull composition and structure, iron carbide and, graphite slag components of scull.

For citation. [Kurunov I.F.], Bliznyukov A.S., Titov V.N., Logvinov N.V., Tikhonov D.N., Sadradinov M.R., Makavetskas A.R., Fischenko Yu.Yu. Study of composition and structure of NLMK BF No. 6 hearth scull (Report 1). *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii* = *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 2, pp. 166–181. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-2-166-181

Анализ опыта работы Японии, Европы, Северной Америки [1–8] позволяет сделать вывод: в настоящее время именно стойкость футеровки горна и лещади определяет продолжительность кампании доменных печей. Особенно показателен пример Японии, доменное производство которой в начале XXI в. было коренным образом модернизировано [9]: число доменных печей (ДП) сократилось с 68 до 28; средний внутренний объем увеличился в 2,7 раза и достиг уровня 4157 м^3 ; существенно выросла и продолжительность кампании. Однако, несмотря на достигнутые успехи (особенно в области создания и совершенствования огнеупоров в этой стране), на заводе Какогава задутая 24 мая 2007 г. ДП № 2 (третья кампания) была остановлена уже в 2010 г. [10]. Это ясно показало, что достигнутый уровень управления ходом печей с целью обеспечения стойкости футеровки горна и формирования гарнисажа все еще недостаточен. В особенности неудовлетворительной представляется техника и средства измерений, предназначенные для контроля внутреннего состояния печи. Автор работы [10] “остро почувствовал, что долгое время оставался “лягушкой в колодце” и “очень рассчитывает на помощь ученых, исследователей и коллег — технических специалистов из других металлургических компаний”. Как отмечают специалисты фирмы United States Steel Corp. [8] по результатам анализа работы 16 ДП, эксплуатируемых в США, Канаде и Словакии: некоторые печи работали в течение 15–20 лет без

существенной работы по обновлению футеровки горна; в других печах проводили обновление футеровки 2 или 3 раза в течение того же периода.

Очевидно, что изучение состава и структуры гарнисажа и футеровки стен горна и лещади и их изменение при различных составе шихты и условиях плавки на разных металлургических заводах и комбинатах позволит не только сформировать “общую теорию” эрозии футеровки — формирования гарнисажа, но и предложить организационные, технические решения с целью снижения затрат на ремонты и повышения технико-экономических показателей доменного производства.

Настоящая работа проводилась в период остановки ДП № 6 Новолипецкого металлургического комбината на капитальный ремонт 2-го разряда с 26.08.2016 г. по 29.09.2016 г. Анализ работы этой печи, а также причин, вызвавших ее остановку на ремонт, будет проведен в следующих сообщениях. Настоящее сообщение посвящено изучению состава и структуры гарнисажа, образовавшегося на стенках горна ниже уровня чугунной летки. После выдувки ДП и ее охлаждения водой в ходе разборки горна футеровка и гарнисаж разрушались гидромолотом и экскаватором выгребались из печи. При этом ежедневно отбирались штучные образцы проб массой от 10 до 70 кг при тщательном визуальном осмотре, чтобы исключить проведение исследований с “окисленными” и “гидратированными” пробами (рис. 1).

Рис. 1. Изображение “окисленных” (а) и “гидратированных” (б) проб

Fig. 1. Picture of “oxidized” (a) and “hydrated” (b) samples

Очевидно, что полив водой шихты как в период выдувки, так и в период охлаждения также приводит к взаимодействию составляющих гарнисаж и футеровку соединений с парами воды по реакциям:

Это приводит к образованию гидроксидов железа (бурый цвет поверхности пробы на рис. 1, а), гидратации силикатов кальция по реакциям (3) и (4), газификации углерода по реакции (5). В результате поверхностный слой пробы приобретает рыхлую, пористую структуру и легко разрушается. Механизм гидратации силикатов кальция изучен при исследованиях связующих веществ (цементов) [11–13], в том числе и доменных шлаков [14, 15]. В результате этого процесса на поверхности проб появляются гидроксид кальция (см. рис. 1, б, белые пятна) и кремнезем [возможно, и гели — $\text{SiO}_2 \cdot (n-1)\text{H}_2\text{O}$].

Пробы, которые в значительной мере не взаимодействовали с парами воды на обращен-

ной внутрь печи поверхности, как показано на рис. 2, всегда имели значительные по толщине отложения углерода (графита). Следует подчеркнуть, что такая же структура гарнисажа обнаружена и при исследованиях проб ДП № 2 Западно-Сибирского металлургического комбината [16, 17]. Методики разделки, подготовки проб и проведения исследований изложены в ранее проведенных работах [18, 19].

Проба № 1 (П1) представляет собой образцы гарнисажа, отобранные ниже уровня чугунной летки на 100 мм.

Макроскопическим исследованием установлено, что материал этого образца имеет пористое строение, состоит из углеродистого вещества, металла, видимые выделения которого достигают 10 мм, и минеральных фаз шлака (рис. 3, а). Поскольку выделения металла как в этой пробе, так и в нижеприведенных имели значительную крупность, то подготовить усредненную пробу для последующих анализов было практически невозможно. В связи с изложенным содержание железа определяли на основе предварительного магнитного фракционирования проб расчетным путем. Качественным рентгеноструктурным анализом установлены минеральные фазы в магнитной фракции: магнетит (Fe_3O_4), окерманит ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), α -железо, графит.

Рис. 2. Изображения проб гарнисажа:

а — отложения углерода на поверхности гарнисажа в нижней части стен горна; б — гарнисаж на стенке в верхней части горна (выше уровня летки); С — углерод; Ш — шлаковая фаза; Me — металл

Fig. 2. Picture of scull samples:

а — carbon deposit at scull surface in the lower part of hearth wall; б — scull at the wall in upper part of the hearth (higher iron notch level); С — carbon; Ш — slag phase; Me — metal

Рис. 3. Проба № 1:

а — внешний вид пробы; в, г, д — увеличенный фрагмент рис. 2, б; б, в — изображение в отраженном свете; г — изображение в обратно рассеянных электронах; д — комбинированное изображение в характеристических лучах элементов. Цифрами на рис. 3, г, указаны минеральные фазы: 1 — α -железо; 2 — осборнит (TiN); 3 — окерманит; 4, 5, 6 — шлаковая фаза переменного состава ($\text{CaO-K}_2\text{O-Na}_2\text{O-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$); 7 — графит

Fig. 3. Sample No. 1:

а — sample external view; в, г, д — magnified fragment of Fig. 2, б; б, в — picture in reflected light; г — picture in back-scattered electrons; д — combined picture in characteristic rays of elements. Mineral phases are designated at the Fig. 3, г, in digits: 1 — α -iron; 2 — osbornite (TiN); 3 — ockermanite; 4, 5, 6 — slag phase of variable content ($\text{CaO-K}_2\text{O-Na}_2\text{O-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$); 7 — graphite

Как следует из химического состава усредненной пробы П1, представленного в табл. 1, преобладающими компонентами пробы являются углерод и железо. В подчиненном количестве в пробе присутствуют оксиды кремния

(4,5 %), кальция (4,01 %), магния (1,06 %) и алюминия (1,1 %). Прочие компоненты (оксиды калия, натрия, марганца, бария и сера) содержатся в количестве <1 %.

ТАБЛИЦА 1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРОБ ГАРНИСАЖА П1 ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА, % (мас.)

TABLE 1. CHEMICAL COMPOSITION OF П1 SCULL SAMPLES AS PER X-RAY SPECTRAL ANALYSIS, % (mas.)

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ^{*1}	S	BaO	C ^{*2}	Сумма
4,50	0,41	1,1	4,01	1,06	0,08	0,63	0,22	34,68	0,6	0,02	49,46	98,58
* ¹ Здесь и далее — расчетное значение.												
* ² Здесь и далее определение содержания углерода проводилось по ГОСТ 32465–2013 на приборе LECO SC-144DR.												

Минеральный состав пробы П1, установленный по данным микрозондового анализа аншлифов, рентгеноспектрального анализа пробы и рентгеноструктурного анализа магнитной фракции, приведен в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ПРОБЫ П1

TABLE 2. MINERAL COMPOSITION OF П1 SAMPLE

Минеральная фаза	Содержание, %
Графит	49,5
Металл (α-железо и карбид железа)	35,1
Магнетит	1,4
Окорманит (Ca ₂ MgSi ₂ O ₇)	6,7
Рентгеноаморфная фаза	6,9
Осборнит	0,3
Сумма	100,0
* Фаза переменного состава в системе CaO–SiO ₂ –K ₂ O–Na ₂ O–Al ₂ O ₃ .	

По данным минералогического исследования, основными фазами в пробе являются графит (49,5 %) и металл (α-железо, карбид железа — 35,1 %), в подчиненном количестве присутствуют окорманит, рентгеноаморфная фаза, магнетит. Оптическим и микрозондовым исследованиями в пробе зафиксированы редкие кристаллы нитрида титана (осборнит) в количестве 0,3 %, выделения которого (см. рис. 3, б–д) находятся в интервале от 1 мкм до 0,15 мм.

Химический состав установленных в пробе минеральных фаз, определенный микрозондовым исследованием, приведен в табл. 3 и 4.

ТАБЛИЦА 3. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОКСИДНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ФАЗ ШЛАКОВ ПРОБЫ П1

TABLE 3. CHEMICAL COMPOSITION OF OXIDE MINERAL PHASES OF П1 SAMPLE SLAGS

Содержание, % (мас.)								Рисунок; точка измерения; фаза
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	S	сумма	
41,60	6,02	37,40	10,77	0,76	—	3,44	99,99	Рис. 3, г.; т. 3; окорманит
44,45	22,58	13,36	8,50	7,85	1,27	1,99	100,00	Рис. 3, г.; т. 4; *
41,32	22,78	11,55	3,24	17,57	1,20	2,35	100,01	Рис. 3, г.; т. 5; *
43,47	22,84	13,08	8,43	9,28	1,30	1,59	99,99	Рис. 3, г.; т. 6; *
* Рентгеноаморфная фаза CaO–SiO ₂ –K ₂ O–Na ₂ O–Al ₂ O ₃ .								

ТАБЛИЦА 4. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВЫДЕЛЕНИЙ ЖЕЛЕЗА И НИТРИДА ТИТАНА В ПРОБЕ П1

TABLE 4. CHEMICAL COMPOSITION OF SELECTIONS OF IRON AND TITANIUM NITRIDE IN П1 SAMPLE

Содержание, % (мас.)						Рисунок; точка измерения; фаза
Fe	Ti	Si	N	C	сумма	
94,99	—	1,89	—	3,12	100,0	Рис. 3, г.; т. 1; α-железо
95,12	—	1,97	—	2,91	100,0	Рис. 3, г.; т. 1; α-железо
—	72,43	—	27,57	—	100,0	Рис. 3, г.; т. 2; осборнит
—	73,02	—	26,98	—	100,0	Рис. 3, г.; т. 2; осборнит

Проба № 2 (П2), отобранная на 300 мм ниже уровня чугунной летки 2, представляла собой керн, который был разделен на три части. Из этих образцов были подготовлены усредненные пробы, химический состав которых представлен в табл. 5. Штуфный образец пробы показан на

рис. 4, а. Как видно из представленных изображений (см. рис. 4, б) распиленной пробы и аншлиф-брикета (см. рис. 4, в), образец представляет собой агрегат металла с редкими включениями шлака в углеродистом веществе.

ТАБЛИЦА 5. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРОБ ГАРНИСАЖА П2 ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА, %

TABLE 5. CHEMICAL COMPOSITION OF П2 SCULL SAMPLES AS PER X-RAY SPECTRAL ANALYSIS, %

Компонент	Проба		
	2/1	2/2	2/3
SiO ₂	3,85	4,79	4,71
TiO ₂	—	0,09	0,09
Al ₂ O ₃	1,52	1,60	1,59
CaO	0,03	0,07	0,07
MgO	—	0,02	0,02
MnO	—	0,02	0,02
Na ₂ O	0,59	0,44	0,12
K ₂ O	0,72	0,95	0,65
Fe* ¹	6,14	31,33	35,88
S	0,15	0,24	0,16
ZnO	—	0,56	0,04
C* ²	79,84	59,30	54,74
Сумма	92,84	99,41	98,09

Рис. 4. Общий вид образца пробы № 2:

а — в объеме; б — поверхность спила; в — аншлиф; Ме — металл; С — графит; Ш — шлаковые включения

Fig. 4. General view of No. 2 sample:

а — in volume; б — cut surface; в — polished section; Me — metal; C — graphite; Ш — slag inclusions

Между гарнисажем и графитовым блоком футеровки, толщина которого в процессе эксплуа-

тации ДП уменьшилась на 100–120 мм, обнаружены пластинчатые выделения металла (рис. 5).

Рис. 5. Общий вид образца металла на футеровке. Образец толщиной до 7 мм имеет рваные края и неровную крючковатую поверхность, покрытую пористым слоем сажистого углеродистого вещества. Металл обладает ферромагнитными свойствами

Fig. 5. General view of metal sample on lining. The sample up to 7 mm thick has torn edges and uneven hooked surface, covered by pored layer of carbonaceous carbon substance. The metal has ferromagnetic properties

Для расчета содержания железа в пробах было предварительно проведено магнитное фракционирование. Выход магнитных фракций в пробах 2/1; 2/2 и 2/3 составил 8,5; 44,0 и 50,5 % соответственно.

Из анализа данных, представленных в табл. 5, следует, что во “вторичном” гарнисаже, механизм образования которого изложен в работе [16], содержание углерода достигает 80 %, а в “первичном” гарнисаже — 55–59 %.

Минеральные фазы в П2 (образец № 2/3) установлены с помощью микроскопического исследования и локального рентгеноспектрального анализа (рис. 6). Как показано на рис. 6, а, металлическое железо представлено как крупными включениями в матрице (обрамлении) выделения углерода, так и мелкодисперсными выделениями в шлаковой фазе. Химический состав минеральных фаз приведен в табл. 6 и 7. Основными минеральными фазами в образце являются графит, металлическое железо (α -железо, карбид железа). Количество в шлаковой составляющей пробы соединений титана в оксидной форме (TiO_2 и фаза переменного состава $\text{TiO}_2\text{--MnO--FeO--V}_2\text{O}_5$) — менее 0,1 %.

а

б

в

Рис. 6. Изображение фрагмента анилифа образца № 2/3:

а — в отраженном свете; б, в — в обратно рассеянных электронах; композиция металлического железа (Me — светлое), углерода (C — бежевое) и шлака (Ш — серое)

Fig. 6. Picture of No. 2/3 sample polished section fragment:

а — in reflected light; б, в — in back-scattered electrons; composition of metal iron (Me — bright), carbon (C — beige) and slag (Ш — gray)

ТАБЛИЦА 6. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОКСИДНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ФАЗ В ОБРАЗЦЕ № 2/3

TABLE 6. CHEMICAL COMPOSITION OF OXIDE MINERAL PHASES IN No. 2/3 SAMPLE

Содержание, %							Рисунок; точка измерения
SiO_2	TiO_2	FeO	MnO	K_2O	Na_2O	V_2O_5	
—	97,85	2,15	—	—	—	—	Рис. 6, б; т. 2
—	52,32	19,84	25,37	—	—	2,47	Рис. 6, б; т. 3
59,92	—	18,26	—	19,15	2,67	—	Рис. 6, в; т. 1

**ТАБЛИЦА 7. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ
ВЫДЕЛЕНИЙ ЖЕЛЕЗА В ОБРАЗЦЕ № 2/3**

**TABLE 7. CHEMICAL COMPOSITION
OF IRON SELECTIONS IN No. 2/3 SAMPLE**

Содержание, %			Рисунок; точка измерения
Fe	C	сумма	
94,99	3,12	100,0	Рис. 6, б; т. 1
95,12	2,91	100,0	Рис. 6, б; т. 4

Проба № 3 (ПЗ) представляет собой образцы гарнисажа, отобранные на уровне чугуновой летки. Макроскопическим исследованием установлено, что штучные образцы пробы ПЗ представляют собой: конгломерат выделений металла, размер которых может достигать 2–5 см (рис. 7, б), блоков сажистого углеродистого вещества, насыщенных тонкодисперсными металлическими вкраплениями (светлое на сером

фоне на рис. 7, б и в), кристаллического графита и шлаковой силикатной фазы. Силикатная фаза образует прожилки и изометричные выделения, границы которых обрамляются кристаллическим графитом. Такая рыхлая, пористая, обломочная структура пробы, как видно из рис. 7, в, не позволяет достичь качественной поверхности при изготовлении аншлифов.

Химический состав усредненной пробы ПЗ представлен в табл. 8. Преобладающими компонентами пробы являются углерод и железо — в сумме >70 %. Основные шлаковые составляющие — оксиды кремния (10,42 %), кальция (9,17 %), алюминия (3,51 %), магния (1,87 %) и калия (1,17 %). Прочие компоненты (оксиды натрия, титана, марганца, бария, цинка, а также сера) содержатся в существенно меньшем количестве (менее 1 %).

Рис. 7. Образец пробы № 3:
а — внешний вид; б — в разрезе; в — анилиф-брикет

Fig. 7. No. 3 sample:
а — external view; б — in section; в — polished section briquette

**ТАБЛИЦА 8. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРОБЫ ПЗ ПО ДАННЫМ
РЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА, % (мас.)**

TABLE 8. CHEMICAL COMPOSITION AS PER X-RAY SPECTRAL ANALYSIS DATA, % (mas.)

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe* ¹	S	ZnO	BaO	C* ²	Сумма
10,42	0,08	3,51	9,17	1,87	0,07	1,17	0,27	35,21	0,55	0,04	0,06	35,68	98,10

Минеральный состав пробы ПЗ, установленный по данным микрозондового анализа аншлифов, рентгеноспектрального анализа пробы и рентгеноструктурного анализа магнитной фракции, приведен в табл. 9.

ТАБЛИЦА 9. МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ПРОБЫ ПЗ

TABLE 9. MINERAL COMPOSITION OF ПЗ SAMPLE

Минеральная фаза	Содержание, %
α-железо (в том числе карбид железа)	36,5

Минеральная фаза	Содержание, %
Графит	35,7
Мелилит (окерманит Ca ₂ MgSi ₂ O ₇ – геленит Ca ₂ Al ₂ SiO ₇)	23,3
Ольдгамит CaS	1,7
Оксиды калия и натрия	1,2
Осборнит (TiN)	0,1
Оксид цинка	0,1
Прочие, в том числе фазы переменного состава CaO–SiO ₂ –K ₂ O–Al ₂ O ₃	1,4
Сумма	100,0

По данным минералогического исследования (рис. 8–11), основными фазами в пробе являются металлическое железо (α -железо + карбид железа — 36,5 %), графит (35,7 %) и минералы группы мелилита (окерманит–геленит — 22,3 %). В существенно меньшем количестве присутствуют силикаты переменного состава ($\text{SiO}_2\text{--CaO--K}_2\text{O--Al}_2\text{O}_3$) — 2,4 % и ольдгамит (CaS) — 1,7 %.

Оптическим и микрозондовым исследованиями в пробе установлено наличие нитрида титана, размер кристаллов которого находится в интервале от 1 мкм до 0,1 мм (см. рис. 8, 9) в количестве 0,1 %. Химический состав установленных в пробе минеральных фаз определен микрозондовым исследованием и приведен в табл. 10 и 11.

Рис. 8. Изображение фрагмента пробы ПЗ (выделения ольдгамита и осборнита в массе мелилита): а — под стереомикроскопом; б — в обратно рассеянных электронах

Fig. 8. Picture of P3 sample fragment (oldgamite and osbornite separations in melilite mass): а — in stereo microscope; б — in back-scattered electrons

Рис. 9. Выделения металлического железа (Me) в агрегате мелилита (Ш) и углеродистого вещества (C): рис. 9, б и в — увеличенный фрагмент рис. 9, а. Цифрами на рис. 9, б, указаны минеральные фазы: 1 — α -железо; 2 — осборнит; 3–5 — минералы группы мелилита. Изображение: а — в отраженном свете; б — в обратно рассеянных электронах; в — комбинированное в характеристических лучах элементов

Fig. 9. Metal iron (Me) separations in melilite aggregation (Ш) and carbonaceous substance (C): at Fig. 9, б and в — magnified fragment of Fig. 9, а. Mineral phases designated at Fig. 9, б, by digits: 1 — α -iron; 2 — osbornite, 3–5 — mineral of melilite group. Pictures made: а — in reflected light; б — in back-scattered electrons; в — combined in characteristic rays of elements

Рис. 10. Выделения металлического железа в агрегате минералов группы мелилита (окерманита и геленита) и углеродистого вещества:

рис. 10, б, в и г — увеличенные фрагменты рис. 10, а. Цифрами на рис. 10, в, указаны минеральные фазы: 1 — металлическое железо; 2, 5 — окерманит; 3 — ольдгамит; 4 — геленит. Изображение: а, б — в отраженном свете; в — в обратно рассеянных электронах; г — комбинированное в характеристических лучах элементов

Fig. 10. Metal iron separations in aggregation of minerals of melilite group (ockermanite and gelenite) and carbonaceous substance:

at Fig. 10, б, в and г — magnified fragment of Fig. 10, а. Mineral phases designated at Fig. 10, в, by digits: 1 — metal iron; 2, 5 — ockermanite; 3 — oldgamite; 4 — gelenite. Pictures made: а, б — in reflected light; в — in back-scattered electrons; г — combined in characteristic rays of elements

Рис. 11. Лейсты графита и микроскопические выделения ольдгамита, железа в массе мелилита: рис. 11, б, в — увеличенный фрагмент рис. 11, а. Цифрами на рис. 11, б, указаны минеральные фазы: 1, 2 — геленит; 3 — ольдгамит; 4 — вкрапление металлического железа. Изображение: а — в отраженном свете; б — в обратно рассеянных электронах; в — комбинированное в характеристических лучах элементов

Fig. 11. Leistes of graphite and microscopic separations of oldgamite, iron in melilite mass: at Fig. 11, б, в and в — magnified fragment of Fig. 11, а. Mineral phases designated at Fig. 11, б, by digits: 1, 2 — gellenite; 3 — oldgamite; 4 — inclusions of metallic iron. Pictures made: а — in reflected light; б — in back-scattered electrons; в — combined in characteristic rays of elements

ТАБЛИЦА 10. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОКСИДНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ФАЗ ШЛАКОВ ОБРАЗЦА ПРОБЫ ПЗ

TABLE 10. CHEMICAL COMPOSITION OF OXIDE MINERAL PHASES OF ПЗ SAMPLE SLAG

Содержание, %									Рисунок; точка измерения; фаза
SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	S	сумма	
39,89	11,31	—	39,04	9,08	0,00	0,68	—	100,0	Рис. 8, в; т. 1; мелилит
40,04	12,07	—	38,05	9,03	0,00	0,81	—	100,0	Рис. 9, б; т. 3; мелилит
45,80	21,80	—	22,45	3,94	4,47	0,51	1,03	100,0	Рис. 9, б; т. 4; геленит
44,85	21,26	—	23,73	4,60	3,93	0,65	0,98	100,0	Рис. 9, б; т. 5; геленит
43,99	5,13	—	37,69	12,25	0,00	0,94	—	100,0	Рис. 10, в; т. 2; окерманит
43,29	5,53	—	37,94	11,63	0,80	0,57	0,24	100,0	Окерманит*
34,57	26,92	1,77	27,16	4,78	4,04	0,00	0,76	100,0	Рис. 10, в; т. 4; геленит
42,86	7,83	1,15	33,28	9,36	3,50	1,64	0,38	100,0	Рис. 10, в; т. 5; окерманит
43,80	18,23	—	27,04	4,50	4,82	0,70	0,91	100,0	Рис. 11, б; т. 1; мелилит
40,31	11,29	—	37,10	9,69	0,63	0,98	—	100,0	Рис. 11, б; т. 2; мелилит

* Область исследований и изображение этой области не приведены в данной статье.

ТАБЛИЦА 11. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВЫДЕЛЕНИЙ ЖЕЛЕЗА, НИТРИДА ТИТАНА И СУЛЬФИДА КАЛЬЦИЯ В ПРОБЕ ПЗ

TABLE 11. CHEMICAL COMPOSITION OF SEPARATIONS OF IRON, TITANIUM NITRIDE AND CALCIUM SULPHIDE IN ПЗ SAMPLE

Содержание, %								Рисунок; точка измерения; фаза
Fe	Ti	Ca	Si	S	N	C	сумма	
		56,80		43,20			100,0	Рис. 8, б; т. 2; ольдгамит
	76,60				23,40		100,0	Рис. 8, б; т. 3; осборнит
93,14			4,66			2,20	100,0	Железо металлическое*
92,63			5,11			2,26	100,0	Рис. 9, б; т. 1; железо металлическое
	80,00				20,00		100,0	Рис. 9, б; т. 2; осборнит
93,73			2,77			3,50	100,0	Рис. 10, в; т. 1; железо металлическое
		57,74		42,26			100,0	Рис. 10, в; т. 3; ольдгамит
93,74			4,03			2,23	100,0	Железо металлическое*

* Область исследований и изображение этой области не приведены в данной статье.

Образец гарнисажа пробы № 4 (П4), отобранный в районе чугунной летки, представляет собой плотный агрегат графита, пронизанного гнездово-вкрапленными выделениями металличе-

ского железа и шлака (рис. 12). Пористость образцов гарнисажа — 5,3 %; плотность — 3,13 г/см³. Химический и минеральный составы пробы П4 приведены в табл. 12 и 13.

Рис. 12. Образец пробы № 4:
а — срез штафного образца; б — анилиф

Fig. 12. Sample No. 4:
а — lump sample cut; б — polished section

**ТАБЛИЦА 12. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРОБЫ П4 ПО ДАННЫМ
РЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА, % (мас.)**

TABLE 12. CHEMICAL COMPOSITION OF SAMPLE П4 AS PER X-RAY SPECTAL ANALYSIS DATA, % (mas.)

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	K ₂ O	Fe* ¹	S	ZnO	C* ²	Сумма
4,89	0,56	0,2	0,41	0,07	0,09	0,06	57,17	0,01	0,02	36,55	98,7

ТАБЛИЦА 13. МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ПРОБЫ П4

TABLE 13. MINERAL COMPOSITION OF П4 SAMPLE

Минеральная фаза	Содержание, %
α-железо (в том числе карбид железа)	56,8
Графит	36,2
Стеклофаза на основе оксида кремния	6,0
Рутил (TiO ₂), пирофанит (MnTiO ₃), ильменит (FeTiO ₃)	1,0
Оксид цинка	<0,1
Сумма	100,0

По данным минералогического исследования, основными фазами в пробе являются металлическое железо (56,8 %) и графит (36,2 %); в подчиненном количестве присутствуют стеклофаза на основе оксида кремния и оксидные минералы титана (пирофанит, ильменит, рутил — 1,0 %).

Взаимоотношение минеральных фаз пробы показано на рис. 13. Химический состав установленных в пробе минеральных фаз определен микрозондовым исследованием и приведен в табл. 14 и 15.

Рис. 13. Выделения металлического железа (светлое на рис. 13, а–в) в агрегате графита (бежевое на рис. 13, а–в) и шлаковой фазы (преимущественно — оксид кремния). Рис. 13, б–г — увеличенные фрагменты рис. 13, а. Цифрами на рис. 13, в, указаны минеральные фазы: 1, 6 — стеклофаза (оксид кремния с примесями); 2 — металлическое железо; 3, 4 — ильменит–пирофанит; 5 — оксид титана. Изображение: а, б — в отраженном свете; в — в обратно рассеянных электронах; г — комбинированное в характеристических лучах элементов

Fig. 13. Separations of metallic iron (bright at Fig. 13, а–в) in graphite aggregation (beige at Fig. 13, а–в) and slag phase (mainly — silicon oxide). At Fig. 13, б–г — magnified fragment of Fig. 13, а. Mineral phases designated at Fig. 13, в, by digits: 1, 6 — glass phase (silicon oxide with impurities); 2 — metallic iron, 3, 4 — ilmenite-pyrophanite; 5 — titanium oxide. Pictures made: а, б — in reflected light; в — in back-scattered electrons; г — combined in characteristic rays of elements

ТАБЛИЦА 14. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОКСИДНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ФАЗ ПРОБЫ П4

TABLE 14. CHEMICAL COMPOSITION OF OXIDE MINERAL PHASES OF П4 SAMPLE

Содержание, %										Рисунок; точка измерения; фаза
SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	K ₂ O	V ₂ O ₅	сумма	
96,21	0,59	1,58	1,13	—	—	—	0,48	—	99,99	Рис. 13, в; т. 1; оксид кремния
1,75	51,22	—	12,39	—	1,80	31,69	—	1,14	99,99	Рис. 13, в; т. 3; пирофанит–ильменит
6,69	68,12	1,48	5,66	3,09	0,51	8,26	0,72	5,47	100,00	Рис. 13, в; т. 4; пирофанит
—	100,00	—	—	—	—	—	—	—	100,00	Рис. 13, в; т. 5; рутил
82,90	1,30	8,58	1,47	—	—	—	5,75	—	100,00	Рис. 13, в; т. 6; оксид кремния
1,44	50,86	—	13,00	—	2,29	31,04	—	1,38	100,01	Пирофанит–ильменит*
—	99,00	—	—	—	—	—	—	1,00	100,00	Рутил*
92,36	—	4,74	—	—	—	—	2,90	—	100,00	Оксид кремния*
94,42	0,81	2,36	1,31	—	—	—	1,10	—	100,00	Оксид кремния*

* Область исследований и изображение этой области не приведены в данной статье.

ТАБЛИЦА 15. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗА В ПРОБЕ П4

TABLE 15. CHEMICAL COMPOSITION OF IRON IN P4 SAMPLE

Содержание, %					Рисунок; точка измерения; фаза
Fe	Ti	V	C	сумма	
97,43	—	—	2,57	100,0	Рис. 13, в; т. 2; железо металлическое
96,18	1,62	0,19	2,01	100,0	Железо металлическое*

* Область исследований и изображение этой области не приведены в данной статье.

Результаты магнитного фракционирования проб представлены в табл. 16 и на рис. 14. Следует отметить, что при измельчении пробы в шаровой мельнице сростки магнетита и окерманита разрушить не удалось, а мягкое α -железо окаталось в шарики вместе с графитом. Это привело к тому, что содержание магнитной фракции всегда превышает содержание железа по результатам химического анализа проб.

ТАБЛИЦА 16. РЕЗУЛЬТАТЫ МАГНИТНОГО ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОБ

TABLE 16. RESULTS OF MAGNETIC FRACTIONATION OF SAMPLES

Проба	Выход фракции, %	
	магнитная	немагнитная
1	47,7	52,3
2/1	8,5	91,5
2/2	44,0	56,0
2/3	50,5	49,5
3	49,4	50,6
4	79,1	20,9
5	39,8	60,2

Проба	Выход фракции, %	
	магнитная	немагнитная
7	6,3	93,8
8	87,0	13,0
9	100	—

Рис. 14. Распределение содержания магнитной фракции в тонкоизмельченной пробе гарнисажа по высоте горна

Fig. 14. Distribution of magnetic fraction content in finely milled sample of scull by hearth height

Заключение

Основные компоненты гарнисажа в горне ДП на уровне и ниже чугунной летки — углерод и металл, в составе которого α -железо, карбиды железа (см. табл. 7), сложные карбиды железа и кремния переменного состава $Fe_xSi_yC_z$ (см. табл. 4 и 11) и выделения графита пластинчатой,

хлопьевидной, глобулярной формы (см. рис. 6, в; 9, в; 10, в). Содержание углерода в металлической фазе, по данным микронзондового анализа (см. табл. 4, 7, 11, 15), составляет 3,12; 2,91; 3,12; 2,91; 2,20; 2,26; 3,50; 2,23; 2,57; 2,01 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Naito M. Development of Ironmaking Technology // Shinnittetsu Giho. 2006. № 384. P. 2–13.
2. Курунов И.Ф., Логинов В.Н., Тихонов Д.Н. Методы продления кампании доменной печи // Металлург. 2006. № 12. С. 34–39.
3. Курунов И.Ф., Логинов В.Н., Тихонов Д.Н. Методы продления кампании доменной печи. Часть 2 // Металлург. 2007. № 1. С. 31–35.
4. Сединкин В.И., Гостенин В.А., Гридасов В.П. и др. Воздействие ввода шунгита в шихту на ход и результаты доменной плавки // Металлург. 2007. № 1. С. 38–40.
5. Shimitzu M., Naito M. Technological Progresses and Researches on Blast Furnase Ironmaking in The New Century // Tetsu-to-Hagane. 2006. V. 92. № 12. P. 2–10.
6. R.J. van Laar, E. van Stein Callentels etc. Blast Furnase Hearth Management for Safe and Longs Campaigns // Iron and Steel Technology Conference Pros. April 27–30. Indianapolis, Indiana. 2003. P. 1079–1090.
7. Увеличение продолжительности кампании доменных печей // Новости черной металлургии за рубежом. 2006. № 2. С. 34–39.

8. Zhao Y., Fu D., Lherbier L.W., Chen Y., Zhou C.Q., Grindey J.G. Investigation of Skull Formation in a Blast Furnace Hearth // *Steel Research International*. 2014. № 5. P. 891–901.
9. Курунов И.Ф. Доменное производство Китая, Японии, Северной Америки, Западной Европы и России // Тр. Междунар. конгресса доменщиков “Доменное производство – XXI век”. — М.: Кодекс, 2010. С. 6–17.
10. Tagawa T. Developments for stabilization of blast furnace operations // *Ferrum*. 2015. V. 20. № 5. P. 202–204.
11. Бутт Ю.М., Беркович Т.М. Вяжущие вещества с поверхностно-активными добавками. — М.: Промстройиздат, 1953. — 247 с.
12. Тейлор Х. Химия цемента / Пер. с англ. — М.: Мир, 1996. — 560 с.
13. Сулименко Л.М., Савельев В.Г., Тихомирова И.Н. Основы технологии вяжущих материалов — М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2001. — 167 с.
14. Гончарова М.Ю. Строительные материалы гидратационного твердения из низкоосновных доменных шлаков: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Белгород, 2000. — 16 с.
15. Малькова М. Ю. Разработка технологии строительных материалов из доменных шлаков: Дис. ... д-ра техн. наук. — Белгород, 2006. — 422 с.
16. Коверзин А.М., Щипицын В.Г., Ващенко А.В. и др. Исследование гарнисажа и футеровки в горне доменной печи № 2 АО ЕВРАЗ ЗСМК (Сообщение 1) // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2018. № 8. С. 17–29.
17. Коверзин А.М., Щипицын В.Г., Ващенко А.В. и др. Исследование гарнисажа и футеровки в горне доменной печи № 2 АО ЕВРАЗ ЗСМК (Сообщение 2) // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2018. № 9. С. 9–24.
18. Близнюков А.С., Садрадинов М.Р., Макавецкас А.Р., Фищенко Ю.Ю. Исследование футеровки горна доменной печи (Сообщение 2) // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2018. № 2. С. 37–43.
19. Близнюков А.С., Фещенко С.А., Курунов И.Ф., Коровушкин В.В. Исследование футеровки горна доменной печи (Сообщение 1) // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2010. № 9. С. 31–36.
20. Huang F., Andrade M., Rickets J. etc. Cleveland No. 6 Blast Furnace Hearth Campaign Extension // *Iron and Steel Technology*. 2016. March. P. 44–56.

Поступила 20 ноября 2018 г.

REFERENCES

1. Naito M. Development of Ironmaking Technology. *Shinnittetsu Giho*, 2006, no. 384, pp. 2–13.
2. Kurunov I.F., Loginov V.N., Tikhonov D.N. Methods of extending the blast furnace operation period. Part 1. *Metallurg*, 2006, no. 12, pp. 34–39. (In Russ).
3. Kurunov I.F., Loginov V.N., Tikhonov D.N. Methods for extending the blast furnace operating period. Part 2. *Metallurg*, 2007, no. 1, pp. 31–35. (In Russ).
4. Sedinkin V.I., Gostenin V.A., Gridasov V.P. etc. The impact of input shungite on the course and the results of blast smelting. *Metallurg*, 2007, no. 1, pp. 38–40. (In Russ).
5. Shimitzu M., Naito M. Technological Progresses and Researches on Blast Furnase Ironmaking in The New Century. *Tetsu-to-Hagane*, 2006, vol. 92, no. 12, pp. 694–702.
6. R. J. van Laar, E. van Stein Callentels etc. Blast Furnase Hearth Management for Safe and Longs Campaigns. Iron and Steel Technology Conference Pros. April 27–30. Indianapolis, Indiana. 2003. pp. 1079–1090.
7. Extension of blast furnaces operation periods. *Novosti chernoi metallurgii za rubezhom*, 2006, no. 2, pp. 34–39. (In Russ).
8. Zhao Y., Fu D., Lherbier L.W., Chen Y., Zhou C.Q., Grindey J.G. Investigation of Skull Formation in a Blast Furnace Hearth. *Steel Research International*, 2014, vol. 85, no. 5, pp. 891–901.
9. Kurunov I.F. *Domennoe proizvodstvo Kitaya, Yaponii, Severnoi Ameriki, Zapadnoi Evropy i Rossii* [Blast furnace production in China, Japan, North America, Western Europe and Russia]. *Trudy Mezhdunar. kongressa domenshchikov “Domennoe proizvodstvo – XXI vek”* [Proc. of the International Congress of BF men “Blast Furnace Production – XXI Century”]. Moscow: Kodeks, 2010, pp. 6–17. (In Russ).
10. Tagawa T. Developments for stabilization of blast furnace operations. *Ferrum*, 2015, vol. 20, no. 5, pp. 202–204.
11. Butt Yu.M., Berkovich T.M. *Vyazhushchie veshchestva s poverkhnostno-aktivnymi dobavkami* [Binding substances with surface-active additives]. Moscow: Promstroizdat, 1953, 247 p. (In Russ).
12. Teilor X. *Khimiya tsementa* [Chemistry of cement]. Moscow: Mir, 1996, 560 p. (In Russ).
13. Sulimenko L.M., Savel’ev V.G., Tikhomirova I.N. *Osnovy tekhnologii vyazhushchikh materialov* [Fundamental of binding materials technology]. Moscow: RKhTU im. D.I. Mendeleeva, 2001, 167 p. (In Russ).
14. Goncharova M.Yu. *Stroitel’nye materialy gidratatsionnogo tverdeniya iz nizkoosnovnykh domennykh shlakov. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Construction materials of hydration hardening of low-base BF slags. Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Belgorod, 2000, 16 p. (In Russ).
15. Mal’kova M.Yu. *Razrabotka tekhnologii stroitel’nykh materialov iz domennykh shlakov. Dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Elaboration of a technology of construction materials of BF slags. Dr. Sci. diss.]. Belgorod, 2006, 422 p. (In Russ).
16. Koverzin A.M., Shchepitsyn V.G., Vashchenko A.V., Bliznyukov A.S., Sadradinov M.R., Makavetskias A.R., Fishchenko Yu.A. The study of the scull and lining in the hearth of the blast furnace No. 2 of JSC EVRAZ ZSMK (Report 1). *Chernaya metallurgiya. Byulleten’ nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 8, pp. 17–29. (In Russ.).

17. Koverzin A.M., Shchipitsyn V.G., Vashchenko A.V., Bliznyukov A.S., Sadradinov M.R., Makavetskas A.R., Fishchenko Yu.A. The study of the scull and lining in the hearth of the blast furnace No. 2 of JSC EVRAZ ZSMK (Report 2). *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tehnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 9, pp. 9–24. (In Russ.).
18. Bliznyukov A.S., Sadradinov M.R., Makavetskas A.R., Fishchenko Yu.Yu. Study of lining of the hearth of a blast furnace (Report 2). *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tehnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 2, pp. 37–43. (In Russ.).
19. Bliznyukov A.S., Feshchenko S.A., Kurunov I.F., Korovushkin V.V. Study of the blast furnace hearth lining (Report 1). *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tehnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2010, no. 9, pp. 31–36. (In Russ.).
20. Huang F., Andrade M., Rickets J. etc. Cleveland No. 6 Blast Furnace Hearth Campaign Extension. *Iron and Steel Technology*, 2016, March, pp. 44–56.

Received November 20, 2018