ИССЛЕДОВАНИЕ ГАРНИСАЖА И ФУТЕРОВКИ В ГОРНЕ ПЕЧИ № 2 АО ЕВРАЗ ЗСМК

Сообщение 3

*А. В. ВАЩЕНКО¹, начальник доменного цеха; А. М. КОВЕРЗИН¹, главный специалист;
В. Г. ЩИПИЦЫН¹, главный специалист по технологии доменного цеха;
А. С. БЛИЗНЮКОВ², канд. техн. наук, технический директор, a.s.bliznjukov@mail.ru;
М. Р. САДРАДИНОВ², директор; А. Р. МАКАВЕЦКАС³, ведущий инженер
Центра ресурсосберегающих технологий переработки минерального сырья;
Ю. Ю. ФИЩЕНКО³, инженер I категории Центра ресурсосберегающих
технологий переработки минерального сырья*

*(¹ ЕВРАЗ ЗСМК, Россия, г. Новокузнецк; ² ООО ТД “Карбон-Шунгит Трейд”, Россия, г. Екатеринбург;
³ Национальный исследовательский технический университет “МИСиС”, Россия, г. Москва)*

Аннотация. Продолжительность кампании современных доменных печей составляет 15–20 лет. Достигнутая длительность их эксплуатации в значительной мере определяется стойкостью футеровки лещади и горна. С целью изучения процессов, влияющих на скорость ее эрозии, осуществлено исследование состава и структуры гарнисажа на футеровке стен горна и лещади доменной печи № 2 ЕВРАЗ ЗСМК после остановки на капитальный ремонт. Приведены результаты визуального осмотра состояния футеровки нижней части горна и лещади. Представлена макроструктура отобранных проб, показан общий вид штучных образцов и аншлиф-брикетов. Исследован минеральный состав проб и химический состав их отдельных минеральных фаз. Установлено значительное увеличение плотности проб, отобранных ниже уровня чугунной летки, что, по мнению авторов, обусловлено увеличением содержания металлической фазы в гарнисаже по высоте горна в направлении от уровня фурм к лещади и значительным изменением пористости гарнисажа как по его горизонтальному сечению, так и по высоте горна. Пористость образцов, отобранных ниже уровня чугунной летки, незначительна и находится на уровне 2,73–3,73 %. Содержащиеся в доменных расплавах газы (кислород, азот, водород) приводят к формированию пористой структуры гарнисажа незначительной толщины в верхних горизонтах горна и леточном канале. Установлено, что на лещади наблюдается накопление цинка, а также его сплавов с железом и свинцом. Макроструктура проб имеет достаточно четко выраженную слоистость. Цинк в пробе существует в виде двух минеральных фаз: оксидной (цинкит) и металлической, часто с примесью железа и редко — свинца. Полученные результаты, наряду с результатами ранее выполненных работ по изучению состояния гарнисажа и футеровки горна доменных печей, лягут в основу теоретического анализа механизма формирования гарнисажа и изменения свойств футеровки, влияющих на продолжительность кампании доменных печей.

Ключевые слова: доменная печь, футеровка стен горна и лещади, макроструктура, состав и структура проб гарнисажа, содержание металлической фазы в гарнисаже, содержание газов в расплавах, пористость гарнисажа, накопление цинка на лещади.

Ссылка для цитирования: Ващенко А.В., Коверзин А.М., Щипицын В.Г., Близнюков А.С., Садрадинов М.Р., Макавецкас А.Р., Фищенко Ю.Ю. Исследование гарнисажа и футеровки в горне доменной печи № 2 АО ЕВРАЗ ЗСМК (Сообщение 3) // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 4. С. 345–352.

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-4-345-352

STUDY OF SCULL AND LINING IN THE HEARTH OF BLAST FURNACE No. 2 OF JSC EVRAZ ZSMK

Report 3

*A. V. VASHCHENKO¹, Head of BF shop; A. M. KOVERZIN¹, Chief specialist; V. G. SHCHIPITSIN¹, Chief specialist on technology, BF shop; A. S. BLIZNYUKOV², PhD (Tech.), Technical Director, a.s.bliznjukov@mail.ru;
M. R. SADRADINOV², Director; A. R. MAKAVETSKAS³, Leading engineer, Center of resources-saving technologies of mineral raw materials processing; YU. YU. FISHCHENKO³, engineer of I category, Center of resources-saving technologies of mineral raw materials processing
(¹ EVRAZ ZSMK, Russia, Novokuznetsk; ² OJSC TD “Karbon-Shungit Trade”, Russia, Ekaterinburg;
³ National Research Technical University “MISiS”, Russia, Moscow)*

Abstract. Modern blast furnaces have operation life of 15–20 years. Such a duration of their operation to a great extent reached due to the resistance of lining of hearth and hearth bottom. To study the processes, effecting the rate of its erosion, a study of composition and structure of the scull on the lining of walls of a blast furnace hearth and hearth bottom was accomplished. For the study the No. 2 blast furnace of EVRAZ ZSMK was chosen after its stoppage for overhaul. Results of visual examination of the state of the

lining of lower part of the hearth and hearth bottom presented. Macro-structure of the picked out samples presented, general view of lump samples and polished section briquettes shown. Mineral composition of the samples and chemical composition of their separate mineral phases studied. It was determined, that the samples density, picked out lower the iron notch, was considerably higher. By authors opinion, it is stipulated by the increase of metal phase content in the scull along the hearth height in the direction from tuyere level to the hearth bottom, as well as considerable change of the scull porosity along both the horizontal section and the hearth height. The porosity of the samples, picked out lower the iron notch, was not high – at the level of 2.73–3.73%. The gases (oxygen, nitrogen, hydrogen) contained in the BF melts, lead to the forming of scull porous structure of insignificant thickness in the upper horizons of the hearth and in the notch channel. It was determined, that a building-up of zinc can be observed on the hearth bottom, as well as its alloys with iron and lead. The samples macro-structure was clear laminated. The zinc in the sample exists in the form of two mineral phases: an oxide phase (zinc oxide) and a metal phase, often with iron contaminant and rarely – with iron and lead. The results obtained, apart from the studies carried out earlier on the scull and BF hearth lining state, will be base of a theoretical analysis of scull forming mechanism and lining properties change, effecting the blast furnaces campaign duration.

Key words: blast furnace, hearth and hearth bottom walls lining, macro-structure, composition and structure of scull samples, content of metal phase in scull, content of gases in melts, scull porosity, zinc build-up on hearth bottom.

For citation: Vashchenko A.V., Koverzin A.M., Shchipitsyn V.G., Bliznyukov A.S., Sadradinov M.R., Makavetskias A.R., Fishchenko Yu.Yu. Study of scull and lining in the hearth of blast furnace No. 2 of JSC EVRAZ ZSMK (Report 3). *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii* = *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2020, vol. 76, no. 4, pp. 345-352. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-4-345-352

Настоящая статья является продолжением статей [1, 2] и посвящена рассмотрению распределения элементов и минералов в структуре гарнисажа, свойств гарнисажа и состава чугуна.

В процессе “разборки” горна было установлено, что разгар лещади был незначительным: на периферии сохранились остатки слоев алюмокарборундового кирпича (рис. 1, а). Однако в центральной части печи верхний слой углеродистых блоков отсутствовал, а во втором ряду блоков лещади образовался дефект — “разгар” неправильной формы около 1500 мм в диаметре и до 150 мм в глубину (см. рис. 1, б), на поверхности которого были обнаружены остатки застывшей части козлового чугуна. Общие виды образ-

ца этой пробы и аншлиф-брикета представлены на рис. 1, в и г соответственно. Макроструктура пробы представляет собой напластование отдельных выделений металла в виде прожилков мощностью до 1 см (светлое на рис. 1, г) в агрегате углеродистого вещества и шлаковых включений. Химический и минеральный составы усредненной пробы представлены в табл. 1 и 2. Следует отметить, что отдельных минеральных фаз, содержащих серу и фосфор, в ходе дальнейших микроскопических исследований не выявлено (рис. 2 и 3, табл. 3). Поэтому не установлено, в какой форме (восстановленной или окисленной: сульфиды/сульфаты и фосфиды/фосфаты) эти элементы присутствуют.

Рис. 1. Изображения разгара футеровки нижней части стен горна и лещади, место отбора пробы Л, внешний вид и аншлиф-брикета пробы Л:

- а: 1 — слои алюмокарборундового кирпича (GSBFCUP-80) по периферии доменной печи, пропитанные чугуном; 2 — часть козлового чугуна, расположенная на слое углеродистых блоков; б — локальный дефект на втором слое углеродистых блоков и место отбора пробы Л; в и г — общий вид штуфных образцов и аншлиф-брикета пробы Л соответственно

Fig. 1. Image of the erosion of hearth and hearth bottom walls lower part lining, place of sample Л pick up, external view and sample Л polished section briquettes:

- а: 1 — layers of aluminum carborundum brick (GSBFCUP-80) along the blast furnace periphery, saturated by hot metal; 2 — a part of frozen iron, located on the layer of carbon blocks; б — local defect at the second layer of carbon blocks and the sample Л pick-up place; в and г — general view of a lump sample and polished section briquettes of the sample Л

ТАБЛИЦА 1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРОБЫ Л
ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНОГО
АНАЛИЗА

TABLE 1. CHEMICAL COMPOSITION OF Л SAMPLE
AS PER X-RAY SPECTRAL ANALYSIS

Компонент	Содержание, % (мас.)
SiO ₂	1,98
Al ₂ O ₃	0,94
Fe	2,43
CaO	0,05
P	0,02
Zn	23,20
ZnO	27,02
S	0,39
C	42,60
Сумма	98,63

ТАБЛИЦА 2. МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ПРОБЫ

TABLE 2. MINERAL COMPOSITION OF THE SAMPLE

Минеральная фаза	Содержание, % (мас.)
Графит	42,6
Металлический цинк (с приме- сью железа, свинца)	25,8
Цинкит	26,5
Неметаллические фазы шлака	5,1
Сумма	100

Рис. 2. Изображение в отраженном свете фрагмента структуры пробы Л:
кристаллические образования цинка (белое) в углеродистой массе (темно-бежевое),
насыщенной выделениями цинкита (серое)

Fig. 2. Image of a sample Л structure fragment in reflected light:
crystal zinc formation (white) in carbonaceous mass (dark beige), saturated by zinc oxide segregations (grey)

Как видно из рис. 2, макроструктура пробы имеет достаточно четко выраженную слоистость. Цинк в пробе существует в виде двух минеральных фаз: оксидной (цинкит) и металлической, часто с примесью железа и редко — свинца (см. рис. 2 и 3). Химический состав установленных в пробе минеральных фаз определен микрозондовым исследованием и приведен в табл. 3.

Следует отметить (см. рис. 3, в), что на поверхности кристаллов металлического цинка (или его сплавов) обязательно наблюдаются выделения цинкита. Очевидно, что в оксидной форме цинк появился при охлаждении водой остатков шихтовых материалов и продуктов плавки в горне печи после выпуска козлового чугуна по реакции

Также для образцов, результаты исследований которых представлены в сообщениях 1 и 2, были определены кажущаяся плотность (плотность образца, объем которого включает все поры и внутренние полости). Как показано в табл. 4, плотность изменяется от 1,95 до 5,03 г/см³. Установлено значительное увеличение плотности проб, отобранных ниже уровня чугунной летки. Это обусловлено, во-первых, увеличением содержания металлической фазы в гарнисаже по высоте горна в направлении от уровня фурм к лещади. Во-вторых, значительным изменением пористости гарнисажа как по горизонтальному сечению гарнисажа, так и по высоте горна. Пористость образцов, отобранных ниже уровня чугунной летки, как показано в табл. 5, незначительна и находится на уровне 2,73–3,73 %.

Рис. 3. Изображения фрагмента пробы 11 в отраженном свете на рис. 3, а; на рис. 3, б — увеличенный фрагмент рис. 3, а; на рис. 3, в — в обратно рассеянных электронах; на рис. 3, г — комбинация в характеристических лучах элементов. Цифрами на рис. 3, в, указаны минеральные фазы: 1, 2, 3 — кристаллический цинк; 4 — сплав железа с цинком; 5, 6 — цинкит; 7 — сплав свинца с железом и цинком

Fig. 3. Images of sample 11 in reflected light at Fig. 3, a; at Fig. 3, б — magnified fragment of Fig. 3, a; at Fig. 3, в — in back scattered electrons; at Fig. 3, г — combined in characteristic rays of elements. At the Fig. 3 mineral phases are designated by digits: 1, 2, 3 — crystal zinc; 4 — alloy of iron and zinc; 5, 6 — zinc oxide; 7 — alloy of lead with iron and zinc

ТАБЛИЦА 3. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОТДЕЛЬНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ФАЗ ПРОБЫ

TABLE 3. CHEMICAL COMPOSITION OF SEPARATE SAMPLE MINERAL PHASES

Содержание, %				Рисунок; точка измерения; состав
Fe	Zn	Pb	O	
9,42	90,58	—	—	Рис. 3; т. 1; сплав цинка с железом
9,87	90,13	—	—	Рис. 3; т. 2; сплав цинка с железом
12,23	87,77	—	—	Рис. 3; т. 3; сплав цинка с железом
71,68	28,32	—	—	Рис. 3; т. 4; сплав цинка с железом
—	79,13	—	20,87	Рис. 3; т. 5; цинкит (ZnO)
—	79,61	—	20,39	Рис. 3; т. 6; цинкит (ZnO)
22,56	8,70	68,75	—	Рис. 3; т. 7; сплав свинца с железом и цинком

ТАБЛИЦА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
КАЖУЩЕЙСЯ ПЛОТНОСТИ ОБРАЗЦОВ

TABLE 4. RESULTS OF THE SAMPLES APPARENT
DENSITY DEFINING

Образец	Кажущаяся плотность, г/см ³
Проба 2	3,46
Проба 4	5,03
Проба 6	1,95
Проба 8	3,44
Проба 13	2,57
Проба 14	2,71

ТАБЛИЦА 5. ПОРИСТОСТЬ ОБРАЗЦОВ ПРОБ

TABLE 5. POROSITY OF SAMPLES

Образец	Пористость, %
Проба Г6, обр. 1/обр. 2	3,73/3,15
Проба Г13, обр. 1/обр. 2	2,73/2,87
Проба Г14, обр. 1/обр. 2	2,71/2,67

Однако гарнисаж на уровне чугунной летки (см. рис. 4), т. е. в зоне, наиболее подверженной износу потоками чугуна и шлака при их выпуске из летки, имеет значительную пористость (до 25–50%).

Рис. 4. Изображение проб гарнисажа на разных участках (а и б) в отраженном свете: шлаковая фаза гарнисажа (серое) с прожилками металла (белое), поры (черное)

Fig. 4. Image of scull samples from various arears (a and b) in reflected light: slag phase of the scull (grey) with metal strings (white), pores (black)

В табл. 6 показаны результаты измерений содержания газов в закаленных пробах чугуна доменной печи № 3 на нескольких выпусках, рабочий режим и шихтовые материалы которой практически подобны таковым на доменной печи № 2. Как следует из полученных результатов измерений, содержание газов по массе составляет десятые (для кислорода) и сотые (для водорода и азота) доли процента. Из ранее проведенных исследований установлено [3–19], что, во-первых, в железоуглеродистых расплавах (чугунах, сталях и сплавах, шлаках) растворимость газов возрастает с увеличением температуры

расплава, во-вторых, растворимость в твердом металле по меньшей мере на порядок ниже, чем в расплаве. Последний фактор позволяет пренебречь количеством газов в затвердевшем железоуглеродистом расплаве. Расчет объема газов по уравнениям газового состояния Клапейрона–Менделеева и/или Ван-дер-Ваальса [20, 21] показывает, что при охлаждении 1 м³ расплава чугуна холодильниками горна на футеровке (углеродистых блоках, алюмосиликатных огнеупорах) возможно выделение до 0,003 м³ водорода, 0,01 м³ азота и значительного количества кислорода (0,025 м³).

ТАБЛИЦА 6. СОДЕРЖАНИЕ ГАЗОВ В ЧУГУНЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ № 3 ЕВРАЗ ЗСМК

TABLE 6. GASES CONTENT IF THE CAST IRON OF BF No. 3 OF EVRAZ ZSMK

Проба	Содержание		
	водород, ppm	кислород, % (мас.)	азот, % (мас.)
Ч1	11	0,021	0,0099
Ч2	17; 11; 23	0,018; 0,0084; 0,0095	0,0093
Ч3	17; 23; 10	0,0095; 0,012; 0,0084	0,0039
Ч4	18; 21; 29; 35	0,0085; 0,019; 0,023	0,0042
Ч5	20; 22; 38; 34	0,019; 0,029; 0,030	0,0050
Среднее по массе, %	0,00198	0,01715	0,00646
Объем, м ³ /м ³ чугуна	0,003	0,025	0,01

Таким образом, поступающие в горн из высокотемпературной фурменной зоны расплавы чугуна и шлака при интенсивном охлаждении в горне на уровне леток и в леточном канале после выпуска продуктов плавки формируют при

затвердевании пористую структуру. Безусловно, теплопроводность такого гарнисажа значительно меньше, чем гарнисажа беспористого, в горизонтах на стенках горна ниже летки и на лещади.

Заключение

В пробах футеровки можно обнаружить соединения самых разнообразных минералов, углерода, металлов и их сплавов. Цинк в виде соединений накапливается не только в гарнисаже верхней части горна и в леточном канале, но и на лещади в металлической форме и в виде сплавов с другими металлами (в этом исследовании — со свинцом и железом). Следует отметить, что в пробах гарнисажа на стенках горна ниже чугунной летки содержание цинка, оксидов щелочных металлов и других шлаковых составляющих невелико. Механизм накопления цинка внизу горна и его влияние на эксплуатационные свойства футеровки лещади и на продолжитель-

ность кампании доменной печи требуют дальнейших исследований.

Высокое содержание газов в продуктах плавки (показано в этом исследовании на примере содержания кислорода, азота и водорода в чугуне) приводит к образованию пористой структуры гарнисажа. Очевидно, что такой гарнисаж имеет низкую теплопроводность, а его толщина в верхней части горна будет незначительной. Для решения этой проблемы необходим в дальнейшем теоретический анализ, проведение лабораторных исследований, изучение футеровки при выдувке других доменных печей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. 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. 9–23.
3. Явойский В.И. Газы и включения в стальном слитке. — М.: Металлургиздат, 1955. — 247 с.
4. Лакомский В.И., Явойский В.И. Газы в чугунах. 2-е изд. — Киев: Гостехиздат УССР, 1960. — 175 с.
5. Новохатский И.А. Газы в окисных расплавах. — М.: Металлургия, 1975. — 216 с.
6. Фромм Е., Гебхард Е. Газы и углерод в металлах / Пер. с нем., под ред. Б.В. Линчевского. — М.: Металлургия, 1980. — 712 с.
7. Константы взаимодействия металлов с газами: справ. изд. / Я.Д. Коган, Б.А. Колачев, Ю.В. Левинский и др. — М.: Металлургия, 1988. — 368 с.
8. Линчевский Б.В. Термодинамика и кинетика взаимодействия газов с жидкими металлами. — М.: Металлургия, 1986. — 222 с.
9. Справочник по чугунному литью / Под ред. Н.Г. Гиршовича. 3-е изд., перераб. и доп. — Л.: Машиностроение, 1978. — 758 с.

10. Даркен Л.С., Гурри Р.В. Физическая химия металлов / Пер. с англ., под ред. Н.Н. Сироты. — М.: Metallurgizdat, 1960. — 582 с.
11. Левинский Ю.В. Диаграммы состояния металлов с газами. — М.: Metallurgiya, 1975. — 295 с.
12. Зяткова Л.Р. Исследование роли растворенных газов в процессе вспучивания доменных шлаков: дис. ... канд. техн. наук. — Челябинск, 1970. — 201 с.
13. Terasaki H., Shibasaki Y., Nishida K. etc. Repulsive Nature for Hydrogen Incorporation to Fe₃C up to 14 GPa // *ISIJ International*. 2014. V. 54. № 11. P. 2637–2642.
14. Nakada N., Fukuzawa N., Tsuchiyama T. etc. Isothermal Transformation in Fe–N Hypereutectoid Alloy // *ISIJ International*. 2013. V. 53. № 1. P. 139–144.
15. Kim Hyun-Soo, Kim Jang Gyu, Sasaki Yasushi. Forward and Backward Reaction Rate Constants of the Reaction of C + O = CO(g) on Fe–C Melts // *ISIJ International*. 2010. V. 50. № 5. P. 678–685.
16. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д., Шпис Г.-И., Бёмер З. Теория и технология азотирования. — М.: Metallurgiya, 1991. — 320 с.
17. Шрейдер А.В. Водород в металлах. Новое в жизни, науке, технике. Сер. Химия. № 9. — М.: Знание, 1979. — 64 с.
18. Касаткин Г.Н. Водород в конструкционных сталях. — М.: Интермет Инжиниринг, 2003. — 336 с.
19. Ивлев С.А. Исследование взаимодействия азота с расплавами на основе железа в системах с различной окисленностью и разработка методов регулирования его содержания: дис. ... канд. техн. наук. — Москва, 2005. — 139 с.
20. Физическая энциклопедия / Глав. ред. А.М. Прохоров. — М.: Советская энциклопедия, 1988. Т. 1. — 704 с.
21. Вукалович М.П. Техническая термодинамика. — М.: Энергия, 1968. — 496 с.

Поступила 27 января 2020 г.

REFERENCES

1. Koverzin A.M., Shchipsitsin V.G., Vashchenko A.V. etc. Study of scull and lining in the hearth of blast furnace No. 2 of JSC EVRAZ ZSMK (Report 1). *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tehnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 8, pp. 17–29. (In Russ.).
2. Koverzin A.M., Shchipsitsin V.G., Vashchenko A.V. etc. Study of scull and lining in the hearth of 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. 9–23. (In Russ.).
3. Yavoiskii V.I. *Gazy i vkladyeniya v stal'nom slitke* [Gases and inclusions in a steel ingot]. Moscow: Metallurgizdat, 1955, 247 p. (In Russ.).
4. Lakomskii V.I., Yavoiskii V.I. *Gazy v chugunakh* [Gases in cast irons]. Kiev: Gostekhizdat USSR, 1960, 175 p. (In Russ.).
5. Novokhatskii I.A. *Gazy v oksnykh rasplavakh* [Gases in oxide melts]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 216 p. (In Russ.).
6. Fromm E., Gebkhard E. *Gazy i uglerod v metallakh* [Gases and carbon in metals]. Moscow: Metallurgiya, 1980, 712 p. (In Russ.).
7. Kogan Ya.D., Kolachev B.A., Levinsky Yu.B. etc. *Konstanty vzaimodeistviya metallov s gazami* [Constants of metal and gases interaction]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 368 p. (In Russ.).
8. Linchevskii B.V. *Termodinamika i kinetika vzaimodeistviya gazov s zhidkimi metallami* [Thermodynamics and kinetics of gases interaction with liquid metals]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 222 p. (In Russ.).
9. *Spravochnik po chugunomu lit'yu / Pod red. N.G. Girshovicha* [Reference book on cast iron castings / Ed. by N.G. Girshovich] Leningrad: Mashinostroenie, 1978, 758 p. (In Russ.).
10. Darken L.S., Gurri R.V. *Fizicheskaya khimiya metallov* / Per. s angl., pod red. N.N. Siroty [Physical chemistry of metals. Transl. from English, ed. by N.N. Sirota]. Moscow: Metallurgizdat, 1960, 582 p. (In Russ.).
11. Levinskii Yu.V. *Diagrammy sostoyaniya metallov s gazami* [Diagrams of metal and gases state]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 295 p. (In Russ.).
12. Zyat'kova L.R. *Issledovanie roli rastvorenykh gazov v protsesse vspuchivaniya domennykh shlakov: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Study of dissolved gases role in the process of blast furnace slags swelling. Cand. Sci. Dis.] Chelyabinsk, 1970, 201 p. (In Russ.).
13. Terasaki H., Shibasaki Y., Nishida K. etc. Repulsive Nature for Hydrogen Incorporation to Fe₃C up to 14 GPa. *ISIJ International*, 2014, vol. 54, № 11, pp. 2637–2642.
14. Nakada N., Fukuzawa N., Tsuchiyama T. etc. Isothermal Transformation in Fe–N Hypereutectoid Alloy. *ISIJ International*, 2013, vol. 53, №1, pp. 139–144.
15. Kim Hyun-Soo, Kim Jang Gyu, Sasaki Yasushi. Forward and Backward Reaction Rate Constants of the Reaction of C + O = CO(g) on Fe–C Melts. *ISIJ International*, 2010, vol. 50, № 5, pp. 678–685.
16. Lakhtin Yu.M., Kogan Ya.D., Shpis G.-I., Bemer Z. *Teoriya i tekhnologiya azotirovaniya* [Theory and technology of saturation by nitrogen]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 320 p. (In Russ.).
17. Shreider A.V. *Vodorod v metallakh. Novoe v zhizni, nauke, tekhnike. Ser. Khimiya* [Hydrogen in metals. New in life, science and technics. Ser. Chemistry]. Moscow: Znanie, 1979, № 9, 64 p. (In Russ.).
18. Kasatkin G.N. *Vodorod v konstruktsionnykh stalyakh* [Hydrogen on structural steels]. Moscow: Intermet Inzhiniring, 2003, 336 p. (In Russ.).
19. Ivlev S.A. *Issledovanie vzaimodeistviya azota s rasplavami na osnove zheleza v sistemakh s razlichnoi oksislennost'yu i razrabotka metodov regulirovaniya ego soderzhaniya: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Study of nitrogen interaction with iron based

- melts in the systems of various oxidation and elaboration of method of its content control. Cand. Sci. Dis.]. Moscow, 2005, 139 p. (In Russ.).
20. *Fizicheskaya entsiklopediya* / Glav. red. A.M. Prokhorov [Physical encyclopedia / Ed. By A.M. Prokhorov]. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1988, vol. 1, 704 p. (In Russ.).
 21. Vukalovich M.P. *Tekhnicheskaya termodinamika* [Technical thermal dynamics]. Moscow: Energiya, 1968, 496 p. (In Russ.).

Received January 27, 2020