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

Сообщение 1

А. М. КОВЕРЗИН¹, начальник доменного цеха; В. Г. ЩИПИЦЫН¹, главный специалист по технологии доменного цеха; А. В. ВАЩЕНКО¹, главный специалист по капремонтам; 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. А. ФИЩЕНКО³, инженер I категории Центра ресурсосберегающих технологий переработки минерального сырья
(¹ АО ЕВРАЗ ЗСМК, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк; ² ООО ТД «Карбон-Шунгит Трейд», Россия, Свердловская обл., г. Екатеринбург; ³ Национальный исследовательский технический университет «МИСиС», Россия, г. Москва)

Аннотация. Приведены результаты исследования состава футеровки и гарнисажа горна ДП № 2 АО ЕВРАЗ ЗСМК после остановки на капитальный ремонт. Установлено, что гарнисаж имеет зональную структуру, обусловленную различными условиями его формирования в периоды эксплуатации печи и при ее выдувке. Гарнисаж состоит из выделений графита, металла и шлаковых включений отчетливо слоистой структуры. Количество шлаковых включений в гарнисаже стен горна ниже уровня чугунной летки невелико и резко возрастает в пробах на уровнях выше летки. В структуре металла в составе гарнисажа преобладает феррит (α -Fe), имеются пластинчатые выделения графита и в небольшом количестве перлит. Количество и толщина выделений металла в пробах возрастают от периферии гарнисажа к центру печи [от 20–30 % и десятков микрон до 70–90 % (мас.) и 30–50 мм соответственно] и уменьшаются от нижней к верхней части стенки горна. В небольшом количестве (менее 2 %) в составе гарнисажа присутствуют нитрид титана (осборнит) TiN и оксид титана (рутил) TiO₂; сульфиды кальция, железа, марганца; карбид кремния SiC. В пробах выше чугунной летки в шлаковых выделениях в гарнисаже содержится значительное количество оксидов щелочных металлов и сульфидов, а в металлической фазе обнаружены фосфиды и сульфиды железа. Это свидетельствует о значительном испарении/сублимации в горне доменной печи соединений калия, натрия, серы и фосфора с последующей их конденсацией/кристаллизацией на охлаждаемой футеровке стен горна.

Ключевые слова: доменная печь; футеровка; гарнисаж; состав гарнисажа; шлаковые выделения в гарнисаже; металлическая фаза гарнисажа.

Ссылка для цитирования. Коверзин А.М., Щипицын В.Г., Ващенко А.В., Близнюков А.С., Садрадинов М.Р., Макавецкас А.Р., Фищенко Ю.А. 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.

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-8-17-29

Настоящее исследование проведено по результатам отбора проб при разборке горна доменной печи (ДП) объемом 2000 м³, которая введена в эксплуатацию 26.04.2005 г. К настоящему времени печь имеет 24 воздушные фурмы, 2 чугунные летки на одном литейном дворе. Для контроля разгара футеровки установлены по 9–13 термопар на трех уровнях. 01.06.2017 г. печь была остановлена на капитальный ремонт 2-го разряда для замены кожуха, системы охлаждения, частичной замены футеровки горна. С 26.04.2005 г. по 01.06.2017 г. было выплавлено 19 314 888 т чугуна. На рис. 1 приведена схема конструкции кладки и ее разгара. Расчетное количество козлового чугуна по вариантам А и Б

должно было бы составить 820 и 864 т. По результатам выпуска реальное количество чугуна для верхней и нижней козловых леток составило около 700 и 100 т соответственно. Длина верхней и нижней козловых леток — 1150 и 1920 мм соответственно. В ходе разборки печи на разных горизонтах (выше и ниже и на уровне чугунной летки, а также на лещади) после дробления гидромолотом отбирались образцы проб гарнисажа массой от 5 до 30 кг, которые сначала разделялись вручную, а затем дробились на щечковых дробилках, усреднялись и подвергались тонкому измельчению. Методика исследований подготовленных проб приведена в работе [1].

Рис. 1. Разгар футеровки горна:

1 и 2 — уровни верхней и нижней козловых леток 6,4 и 5,5 м соответственно; А и Б — расчетные профили разгара футеровки

Fig. 1. Erosion of hearth lining:

1 and 2 — levels of upper and lower tap holes 6.4 and 5.5 m correspondently; A and B — calculated profiles of lining erosion

Анализ проб

Проба Г-21 (“первичный” гарнисаж) отобрана с уровня ниже чугунной летки на 200–300 мм (рис. 2 и 3). Образец представляет агрегат металла, графита и включений шлака в небольшом количестве. Внешняя поверхность образца (поверхность, соприкасающаяся с расплавом), как показано на рис. 2, а, представляет собой наложение пластинчатых и чешуйчатых выделений графита с характерным металлическим блеском. Тыльная сторона уплотненного агрегата имеет неровную ямчато-бугорчатую, занозистую поверхность темно-серого или черного цвета (см. рис. 2, б). На поверхности присутствует корка скрытокристаллического или “аморфизованного” углеродистого вещества (черного цвета с матовым блеском). Несмотря на сажистую текстуру, корка очень прочная и образует сплошной агрегат с металлом и шлаком. Образец имеет четкую слоистую текстуру, которая подчеркивается ориентацией пластинчатых выделений графита, что видно на поперечном изломе пробы (см. рис. 3, а, б).

В ранее проведенных исследованиях на ДП РФ было установлено, что основными компонентами гарнисажа являются металл, углерод, шлаковые включения [1–3].

В данной работе при ежедневном осмотре состояния футеровки и гарнисажа с отбором и последующим визуальным осмотром при разделке проб выявлено:

1. В радиальном направлении от холодильников к центру ДП эта макроструктура имеет ярко выраженную “зональность”: футеровка (Ф) (кирпич/углеродистый блок) — “перерожденная футеровка” (ПФ) — гарнисаж “первичный” (Г1) — гарнисаж “вторичный” (ГII).

2. При выдувке печи с целью сокращения периода охлаждения на опускающийся слой холодных коксовых подач (шихты) подается вода, что приводит к окислению и гидратации компонентов гарнисажа и футеровки. Это предопределяет необходимость визуального осмотра и сортировки ступенчатых образцов проб, полученных в результате дробления гидромолотом.

Рис. 2. Внешний вид пробы Г-21:

а — обращенная к расплаву металла и шлака в горне ДП сторона образца; б — увеличенный фрагмент тыльной стороны образца; Ш — шлаковые включения

Fig. 2. External view of Г-21 specimen:

а — metal melt and slag faced side of a specimen in the BF hearth; б — increased fragment of back side of the specimen; Ш — slag inclusions

Рис. 3. Вид в поперечном сечении образца ГII (проба Г-21):
а и б — внешний слой углерода; в — с прослойкой металла; III — шлаковые включения; TiN — мелкодисперсные кристаллы нитрида титана (осборнита); C + Me — углерод и металлические включения; III — гидратированные шлаковые включения

Fig. 3. Cross section view of GII specimen (G-21 sample):
a and б — external carbon layer; в — with metal layers; III — slag inclusions; TiN — fine crystals of titanium nitride (osbornite); C + Me — carbon and metal inclusions; III — hydrated slag inclusions

Помимо неметаллических выделений графита и минералов шлака в образце зафиксированы скопления кристаллов ярко-оранжевой/желтой окраски с характерным металлическим блеском (см. рис. 3, б). Микрозондовым исследованием установлен химический состав выделений, соответствующий нитриду титана — осборниту (TiN). Кажущаяся плотность образцов данной пробы находится в интервале от 4,96 до 5,50 г/см³. Пористость образцов — 1,15–3,21 %. Оптическими исследованиями аншлифов в отраженном свете установлено, что пластинчатые и каплевидные выделения металла насыщены микровыделениями графита; металлические пластинки, в свою очередь, обрамлены пластинчатым графитом; на границе металл – графит наблюдаются кристаллы осборнита (рис. 4).

Рис. 4. Выделения графита (пластинчатые и шарообразные выделения серого цвета на белом фоне металла) и осборнита (оранжевые) в прослоях металлического железа. Изображение в отраженном свете

Fig. 4. Segregation of graphite (lamellar and ball-shaped grey segregations on white metal background) and of osbornite (orange) of metal layers. Picture in reflected light

На рис. 5 приведено изображение образца пробы Г-6 (“первичный” гарнисаж), отобранного на уровне приблизительно ниже на 100 мм от уровня чугуновой летки. По данным химического рентгеноструктурного и микрозондового анализов определен минеральный состав пробы (табл. 1, 2). Как следует из результатов анализов усредненных частей А и В этой пробы, гарнисаж в основном состоит из графита, металлического железа и карбида железа; количество шлаковых включений со структурой мелилита, муллита, шпинели — около 5 %; содержание силикатов железа и сульфидов железа, цинка, марганца — 0,5–1,0 %; в значительном количестве присутствует отдельная фаза кристобалит* — 9,6 %; содержание карбидов кремния, нитридов титана невелико. В виде отдельной фазы также обнаружен в незначительном количестве рутил (TiO₂).

Пробы Г-4 и Г-10 отобраны (рис. 6, 7) на уровне чугуновой летки и выше на 50–100 мм и представляют собой типичные образцы “первичного” гарнисажа. Как и в предыдущих образцах проб, в них наблюдаются: выделения металла; поверхность металла с внутренней (обращенной внутрь горна) стороны покрыта коркой крупнокристаллических пластинчатых выделений графита.

* Об образовании этой фазы — в следующих сообщениях.

Рис. 5. Разделенная на слои проба Г-6:

A — слой включений металла и шлака в углеродной матрице (C + Me), образовавшийся на границе с металлом Б; Б — слой сплошного металла, на поверхности которого отложения углерода и металла (слой А); В — слой гарнисажа под слоем металла Б из углерода и мелкодисперсных включений металла

Fig. 5. Г-6 sample split into layers:

A — layer of metal inclusions (C + Me), formed at the border with the metal Б; Б — layer of solid metal, at the surface of which carbon and metal sediments (A layer); В — scull layer under metal Б layer of carbon and fine metal inclusions

ТАБЛИЦА 1. МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ПРОБЫ Г-6

TABLE 1. MINERAL COMPOSITION OF Г-6 SAMPLE

Фаза	Формула	Содержание, % (мас.)
Железо, когениит (цементит)	Fe, Fe ₃ C	19,7
Графит	C	62,0
Муассанит	SiC	0,5
Кристаллит	SiO ₂	9,6
Осборнит (нитрид титана)	TiN	1,4
Сульфиды железа, цинка, марганца	MeS	1,0
Силикат железа	2FeO·SiO ₂	0,5
Мелилит, муллит, шпинель и др. (шлак)		5,3
Сумма		100,0

ТАБЛИЦА 2. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРОБЫ Г-6, %

TABLE 2. CHEMICAL COMPOSITION OF Г-6 SAMPLE, %

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Fe	S	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	ZnO	C
13,92	0,11	1,40	0,40	0,05	0,22	0,31	0,77	0,06	21,3	0,22	0,03	0,02	0,23	62

Рис. 6. Вид пробы Г-4 в поперечном сечении:

а и б — пробы на уровне чугунной летки; Me — металл; Ш — гидратированные шлаковые включения; C + Me — углерод с включениями металла и шлака (а); C + Me — окисленный слой углерода с включениями металла и оксидов металла (б)

Fig. 6. Cross section Г-4 sample view:

a and б — samples at the level of hot metal tap hole; Me — metal, Ш — hydrated slag inclusions; C + Me — carbon with metal and slag inclusions (a); C + Me — oxidized layer of carbon with metal and metal oxides inclusions (б)

Рис. 7. Проба Г-10:

а — проба в разрезе; б — внешний вид пробы; Me — слой металла; C — слой графита с включениями металла и шлака; Fe₂O₃ — окисленный поверхностный слой металла

Fig. 7. Г-10 sample:

a — sample cross section; б — external view of the sample; Me — metal layer; C — graphite layer with metal and slag inclusions; Fe₂O₃ — oxidized surface metal layer

Как следует из визуального осмотра штучных образцов, толщина слоя металла в слое “первичного” гарнисажа может достигать 1–5 см (см. рис. 6, 7). Разделка такого гарнисажа для подготовки проб требует применения специального инструмента и затрат времени до 1–3 ч на одну пробу для вырезания образцов/кernов. Безусловно, технология с извлечением kernов [4] позволяет получать более точный количественный послойный состав футеровки и гарнисажа, однако при нормированных сроках ремонта (разборки горна) ее применение именно на ДП нецелесообразно вследствие нарушения графика ремонта.

При поливе водой шихты в период выдувки печи на штучных образцах проб выявлены “окисидные и гидратированные корки” толщиной несколько миллиметров, представленные агрегатами минералов шлака и продуктов окисления железа (см. рис. 3, в; 6, б; 7, б). Исследования состава этих продуктов не проводилось. Однако этот выявленный факт требует селективного отбора проб и их сортировки/отбраковки как на разборке печи, так и в ходе их последующей подготовки.

На рис. 8 и 9 приведен внешний вид ашлиф-брикетов (диаметр 30 мм) проб различных зон гарнисажа и футеровки в радиальном сечении и по высоте горна. Следует отметить, что выделения металла в пробах “первичного” и “вторичного” гарнисажа, как правило, расположены параллельно холодильникам горна (в вертикаль-

ной плоскости). Образцы пробы Г-6 на границе “вторичного” и “первичного” гарнисажа (см. рис. 9, а) представляют собой композицию углеродистого вещества, металлической и шлаковой фаз; при этом слоистые, достаточно массивные выделения металла насыщены пластинчатыми выделениями графита. А на границе с футеровкой в структуре этой пробы углеродистое вещество и шлак образуют брекчиевидную текстуру, обусловленную присутствием более крупных обломков этих фаз в массе тонкозернистого материала такого же состава. Форма выделения металла: цепочечные, линейно вытянутые образования (менее 0,5 мм), формирующие псевдокаркасную структуру в общей массе (см. рис. 8, а). На рис. 8, б, показана макроструктура пробы Г-2, отобранной над чугуной леткой, представляющая собой неупорядоченную композицию минералов шлака, металлического железа и углеродистого вещества. Выделения металла имеют неправильную форму “залитов” в агрегате шлака. Гарнисаж под чугуной леткой (проба Г-8) состоит из выделений металлического железа в брекчиевидном агрегате углеродистого вещества и минералов шлака (см. рис. 8, в). Металл в изученных образцах присутствует в виде линз и образований неправильной формы; мощность металлических линз достигает 2 см. По контакту выделений металла и основной массы наблюдается оболочка шлаковых минералов. Выделения металла и шлака насыщены пластинчатыми кристаллами графита.

Рис. 8. Общий вид ашлиф-брикетов:

а — проба Г-6; б — проба Г-2; в — проба Г-8; г — проба Г-20; д — проба Г-13; е — проба Г-14;
белое — металл; светло-серое — шлак; темно-серое — графит

Fig. 8. General view of briquette thin sections:

а — Г-6 sample; б — sample Г-2; в — sample Г-8; г — sample Г-20; д — sample Г-13; е — sample Г-14;
white — metal; light grey — slag; dark-gray — graphite

Рис. 9. Внешний вид проб:
а — анилиф-брикет пробы Г-6; б — проба Г-14 в разрезе

Fig. 9. External view of samples:
а — G-6 sample briquette thin section; б — G-14 sample cross section

Образец пробы Г-20 (“первичный” гарнисаж), как показано на рис. 8, з, представляет собой агрегат металла, графита и минералов шлака слоистой текстуры. Пластинчатые образования металлического железа на микроскопическом уровне также переслаиваются с графитом и оксидными фазами шлака. Как следует из изображения на рис. 10 фрагмента структуры пробы Г-20, выделения графита — прожилковидные, извилистой формы черного цвета (скрытокристаллический графит) и пластинчатые (коричневые лейсты/чешуи): именно так наблюдается спаянность и характерная отражательная способность графита. Толщина пластинчатых образований углерода в металле аналогична выделениям в шлаке и составляет 1–20 мкм.

Рис. 10. Пластинчатые выделения графита (темно-бежевые) в массивных выделениях железа (светлое). Изображение в отраженном свете фрагмента пробы Г-20

Fig. 10. Lamellar graphite segregations (dark beige) in the mass iron segregations (light). Picture in the reflected light of G-20 sample fragment

Штуфный образец пробы Г-13 “перерожденной футеровки” характеризуется неоднородной текстурой, отмечаются участки более массивного сложения и брекчиевидной текстуры; редкие выделения металла визуализируются в виде тонких (1–3 мм) прожилок (см. рис. 8, д).

Проба Г-14 — типичный образец “перерожденной футеровки” в районе ниже леток. На рис. 9, б, представлен внешний вид образца в разрезе, а на рис. 8, е — увеличенный фрагмент этой пробы. Она содержит алюмосиликатные фазы, в массе которых отмечаются неравномерно проявленные тонкие цепочечно-каркасные выделения металла толщиной менее 0,5 мм.

Химический и минералогический состав “перерожденной футеровки” представлен в табл. 3 и 4.

ТАБЛИЦА 3. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРОБЫ Г-14 ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА, %

TABLE 3. CHEMICAL COMPOSITION OF G-14 SAMPLE AS PER SPECTRAL ANALYSIS DATA, %

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Fe	S	SrO	Cr ₂ O ₃	ZnO	C
29,53	1,15	48,86	0,61	0,27	0,03	0,90	2,03	1,01	13,79	4,46	0,03	0,02	0,03	0,75

ТАБЛИЦА 4. МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ПРОБЫ Г-14

TABLE 4. MINERAL COMPOSITION OF THE G-14 SAMPLE

Фаза	Формула	Содержание, %
Корунд	Al ₂ O ₃	14,1
Муллит	Al ₆ Si ₂ O ₁₃	49,2
Железо	Fe	13,7
Графит	C	0,8
Лейцит	KAlSi ₂ O ₆	4,3
Анортит	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	3,0
Кварц	SiO ₂	10,3
Калиофилит	KAlSiO ₄	3,8
Прочие		0,8
Сумма		100,0

Углерод

Особо следует отметить, что углерод во всех пробах настоящего и ранее проведенных исследований [1–3] на спектрограммах идентифицирован как графит. Действительно в пробах “первичного” и “вторичного” гарнисажа (и в шлаковых включениях, и в металле) визуально обнаружен углерод, соответствующий минералу графиту. Структура и свойства графита: жирный (скользящий) на ощупь; легко расслаивается при трении — “мажется”; мягкий с низкой твердостью (1 по шкале Мооса); цвет темно-серый, блеск металлический; структура слоистая; слои слабоволнистые, почти плоские; кристаллы пластинчатые, чешуйчатые; как правило, наблюдаются листоватые и реже — радиально-лучистые агрегаты; ярко выраженная анизотропия свойств поперек и вдоль базисной кристаллической решетки.

Однако в процессе длительной кампании печи под действием высоких температур, давления, газовой атмосферы, в присутствии металла и шлака происходит “аморфизация”/“коксование”/рекристаллизация углерода в слое “вторичного” гарнисажа. Согласно современным представлениям при смещении s- и p-электронов возможна гибридизация электронных оболочек этого элемента (sp^3 , sp^2 , sp) с образованием трех основных аллотропных модификаций углерода: алмаза, графита, карбина. К настоящему времени выявлено и исследовано множество кристаллических (алмаз, графит, карбин, лонсдейлит, наноалмаз, фуллерены, фуллерит, углеродное волокно, углеродные нановолокна, углеродные нанотрубки) и аморфных (активированный, древесный и ископаемые угли; коксы — каменноугольный, нефтяной и др.; стеклоуглерод; те-хуглерод; сажа) форм углерода [5–14]. Установлено, что аморфные формы являются химическими соединениями с высоким содержанием углерода, а не чистой аллотропной формой углерода. В общем случае, как отмечено в работе [9]: “Если в традиционно-классическом подходе сама идея о возможности существования переходных форм углерода в кристаллическом виде (регулярного типа) представлялась абсурдом, то опыт, наоборот, указывает скорее на существование необозримо большого множества кристаллических форм углерода. Этот феномен отражает многоликость и уникальность углерода как элемента... Электронная подсистема кооперированной системы атомов углерода весьма лабильна. Она характеризуется множеством метастабильных состояний; возможны переходы из

одного состояния в другое... даже при одной и той же фиксированной конфигурации ядер... В этом смысле однокомпонентное вещество, состоящее, казалось бы из одинаковых атомов С, в действительности правильнее рассматривать из разнотипных атомов, не тождественных друг другу. Возможные комбинации даже трех сортов атомов углерода (в действительности их больше) весьма многочисленны и разнообразны; по существу, они представляют собой системы неопределенного состава, регулярного и нерегулярного строения. ... некоторые кристаллические формы углерода (из бесконечного их многообразия) обладают уникальными свойствами: электрофизическими, магнитными, механическими и т. п. ... Способность углерода к совместной кооперации (полимеризации), возрастающая при высоких температурах, выгодно отличает его от других полимеров, для которых характерна деструкция при нагревании”. На практике процесс такой “полимеризации” под действием вышеперечисленных факторов приводит к появлению плотной камнеподобной (при небольшой пористости) структуры гарнисажа “первичного”, матрицей которой является углерод (по объему до 80–90 % в пробах). Этот гарнисаж не имеет анизотропии свойств, характерной для графита; его твердость и прочность значительны. Механизм образования в гарнисаже такой структуры углерода требует дальнейшего изучения.

Металл

В гарнисаже доменной печи кроме представленных выше также обнаружены крупные отдельные пластинчатые выделения металла (см. рис. 11) и “заливы” неправильной формы с сильно бугристой поверхностью (см. рис. 11, в). Пластинчатые выделения металла, как правило, толщиной 3–5 мм с ровной поверхностью и тонкой оксидной коркой минералов шлака и углерода обнаружены на поверхности и в швах углеродистых блоков и кирпичной кладки футеровки.

Особо следует отметить, что в районе чугунной летки № 2 выявлены достаточно крупные уплощенные формирования/“заливы”, а на поверхности холодильников (в засыпке между футеровкой и холодильниками) — уплощенные “заливы” металла (см. рис. 8, б; 11, в). Установлено, что футеровка в районе леток практически отсутствовала; ДП “работала на гарнисаже”, состоящем из шлаковых и металлических фаз беспорядочного крупноблочного строения.

Рис. 11. Выделения металла:

а — пластинчатые в швах футеровки (проба Г-16); б — пластинчатые в швах футеровки (проба Г-11); в — в нижней части летки 2 (проба Г-3); 1 — “залив” металла в гарнисаже; 2 — “залив” в металла в разрезе; 3–6 — пластинчатые “заливы” металла на леточных холодильниках (в засыпке)

Fig. 11. Metal release:

а — lamellar in seams of lining (Г-16 sample); б — lamellar in seams of lining (Г-11 sample); в — in lower part of tap hole 2 (Г-3 sample); 1 — “flooded” by metal in scull; 2 — “flooded” by metal in cross section; 3–6 — lamellar “flooded” by metal at tap hole coolers (in filling)

Результаты химического состава металла из некоторых проб гарнисажа представлены в табл. 5.

ТАБЛИЦА 5. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ МЕТАЛЛА В ПРОБАХ ГАРНИСАЖА

TABLE 5. CHEMICAL COMPOSITION OF METAL IN SCULL SAMPLES

Проба	№	Содержание, % (мас.)												
		Fe	C	P	Si	Mn	Cu	Cr	V	Ti	Ni	Al ₂ O ₃	MgO	S
Г-4* ¹	Основа	0,5	—	—	2,1	0,96	0,01	0,08	0,14	0,31	—	—	—	—
Г-3* ¹	Основа	<0,1	—	—	0,03	<0,1	0,06	0,03	—	—	0,05	—	—	—
Г-10* ¹	Основа	<0,1	—	—	0,15	0,23	0,01	0,04	0,05	—	—	—	—	—
Г-11* ¹ (Г-2)	Основа	0,6	—	—	0,02	0,25	0,06	0,05	0,1	—	—	1,0	0,1	—
Г-16* ¹	Основа	0,7	—	—	0,06	0,18	0,06	0,11	0,06	0,1	0,01	—	0,02	—
Г-14* ²	1	97,18	—	2,82	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2	82,84	14,17	2,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	3	82,35	14,27	3,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Г-2* ²	1	97,12	2,88	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2	97,22	2,03	0,76	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Г-6* ²	1	97,16	1,96	—	0,88	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2	95,53	3,10	—	1,37	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	3	97,16	1,28	—	1,55	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Г-7* ²	1	96,90	1,97	—	1,13	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2	97,08	1,97	—	0,95	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	3	96,96	1,78	—	1,27	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Г-13* ²	1	97,78	2,22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2	98,49	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,51
	3	97,76	2,24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Г-20* ²	1	98,12	—	—	1,88	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2	98,11	—	—	1,89	—	—	—	—	—	—	—	—	—

*¹ По данным спектрального атомно-эмиссионного анализа с искровым возбуждением по центру спектра.

*² По данным микрозондового анализа.

Анализ результатов состава металла в пробах по усредненным данным атомно-эмиссионного анализа показал, что состав металла соответствует составу конструкционной стали, т. е. сплаву железа с углеродом, обладающему высокой твердостью и прочностью. На практике это приводит, во-первых, к проблемам при отборе и подготовке проб для исследования гарнисажа. Во-вторых, обуславливает известный всем до-

менщикам факт: при бурении даже с использованием специального инструмента не удастся открыть летки для выпуска козлового чугуна (для их вскрытия после бурения обязательно используется прожигание кислородом). Именно сжигание железа и углерода “первичного” и “вторичного” гарнисажа в кислороде и обеспечивает вскрытие леток.

Особо следует отметить, что в пробах металла, по данным микрозондового анализа, можно обнаружить микровключения с очень высоким содержанием углерода — >14 %, кремния — до 2 %, фосфора — >3 %, серы — около 1,5 %.

При выплавке передельного чугуна в доменной печи (содержание углерода в нем составляет около 4,6–4,8 % [15]) при охлаждении и кристаллизации на охлаждаемой подложке (футеровке/гарнисаже) по результатам проведенных исследований установлено:

– основа структуры металла — феррит (твердый раствор внедрения С в α -железе с объемно-центрированной кубической решеткой). Этот факт подтвержден и ранее проведенными исследованиями состава металла в гарнисаже ДП

НПО “Тулачермет” с использованием мессбауэровской спектроскопии [1];

– в матрице феррита также выявлены участки со структурой перлита (эвтектоидная смесь, состоящая из тонких чередующихся пластинок феррита и цементита).

К аналогичным выводам в результате исследования кернов футеровки ДП № 1 в Тобата пришли А. Shinotake и др. [4]: гарнисаж на стенках горна плотностью от 5 до 7 т/м³ состоит из железа и углерода (содержание С >10 %); в матрице из феррита присутствует слоистый перлит; в части образцов наблюдалось небольшое количество кристаллов TiN.

О формировании шлаковых включений в гарнисаже — в следующих сообщениях.

Закключение

В ходе исследований определена макро-структура боковой стенки горна доменной печи после ее выдувки (рис. 12). На основании визуального осмотра, изучения химического и минералогического состава проб, а также анализа диаграммы железо–углерод [16–21] (рис. 13) и механизма кристаллизации железоуглеродистых сплавов, подробно исследованного и описанного в монографиях [22–24], можно объяснить наблюдаемую на практике структуру гарнисажа в горне доменной печи.

Очевидно, что в процессе длительной эксплуатации футеровка (как из огнеупорных керамических материалов, так и из углеродистых блоков) разрушается под действием потоков расплавов. Причем этот процесс происходит особенно активно во время выпуска как за счет механического износа/размывания потоками продуктов плавки, так и растворения компонентов футеровки в шлаке и чугуне. В работах японских и китайских исследователей [25, 26] предпринята попытка оценки на основе физического и математического моделирования скоростей потоков в объеме горна с учетом “плавающего или неподвижного тотермана”. Несмотря на принятые в расчетах допущения, качественные результаты расчетов очевидны:

– основные потоки чугуна и шлака на ДП большого объема сосредоточены в узкой кольцевой пристеночной области;

– скорости потоков имеют максимальное значение в леточном канале и вблизи леток.

Рис. 12. Схема эрозии футеровки и образования гарнисажа:

1 — кожух печи; 2, 4 — засыпка; 3 — холодильник;
Ф — футеровка; ПФ — “перерожденная футеровка”;
ГП — гарнисаж “первичный”; ГИ — гарнисаж “вторичный”;
Ш — шлак; Me — металл; ● — коксовая насадка;
★ — шлаковые включения в гарнисаже;
■ — пластинчатые и каплевидные мелкодисперсные включения металла в гарнисаже; ≡ — лейсты металла в “перерожденной футеровке”; светло-серый фон в областях ГП и ГИ — углерод; темно-серое в области ГИ — массивные выделения металла

Fig. 12. Diagram of lining erosion and formation of scull:

1 — furnace shell; 2, 4 — filling; 3 — cooler; Ф — lining;
ПФ — “reborn lining”; ГП — “primary” scull;
ГИ — “secondary” scull; Ш — slag; Me — metal; ● — coke filling; ★ — slag inclusions in scull; ■ — lamellar and drop-like fine inclusions of metal in scull; ≡ — bar-like formations of metal in the “reborn lining”; light-grey background in ГП and ГИ areas — carbon, dark-grey in ГИ area — massive metal segregation

Рис. 13. Диаграмма железо–углерод со схемой эрозии-образования гарнисажа

Fig. 13. Iron –carbon diagram with outline of erosion – scull formation

Известно, что температура чугуна и шлака по ходу выпуска увеличивается, что приводит к растворению углерода из футеровки и/или гарнисажа и металла гарнисажа в чугуне, согласно схеме на рис. 13 (красная стрелка). Очевидно, что этот процесс особенно интенсивно реализуется на выпусках. Такой процесс — один из многих возможных механизмов эрозии/износа футеровки.

Однако износ огнеупоров и снижение толщины кладки приводят к увеличению отвода тепла на холодильниках (Q), охлаждению продуктов плавки в период между выпусками. Снижение температуры чугуна согласно схеме на рис. 13 (по синей стрелке) обуславливает кристаллизацию из расплава графита (область 2) и цемента Fe_3C (область 3).

Очевидно, что активное формирование “вторичного” гарнисажа ГII происходит при интенсивном охлаждении слоя шихты (в том числе и коксовой насадки) и продуктов плавки в период выдувки печи за счет испарения влаги (полив водой слоя шихты при выдувке ДП) и протекания эндотермической реакции:

Выводы

1. Макроструктура внутреннего строения футеровки и гарнисажа в радиальном направлении от холодильников к центру ДП имеет отчетливо выраженную зональность: футеровка — “перерожденная футеровка” — гарнисаж “первичный”, образовавшийся в процессе длительной кампании

Именно за счет быстрого охлаждения и формируется структура металлических включений с высоким содержанием углерода и цементита (см. табл. 5). Напротив, металл в составе “первичного” гарнисажа при длительном воздействии высоких температур подвергается “отжигу”/перекристаллизации, что и приводит, согласно диаграмме (см. рис. 13), к формированию структуры феррита с включениями графита (см. рис. 10).

Итак, охлаждение водой приводит при резком снижении температуры расплава к формированию отчетливо выраженного, значительной толщины слоя графита (обращенного к внутреннему объему горна) и значительных по толщине слоев металла, как показано на рис. 3, 5–7. Напротив, при медленном охлаждении (в тонком пристеночном слое) расплавов в горне в период эксплуатации печи при кристаллизации металла, шлака и углерода образуется, как правило, тонкослоистая структура “первичного” гарнисажа ГI. В связи с вышеприведенными исследованиями и проведенным анализом следует особо подчеркнуть, что процесс эрозии-гарнисажеобразования постоянный и динамический процесс. Очевидно, что любые изменения, вызванные как снижением отвода тепла на холодильниках, так и повышением температуры продуктов плавки по разным причинам, приводят к интенсификации процессов эрозии футеровки/гарнисажа ГI, и в конечном счете к сокращению продолжительности кампании ДП. Также очевидно, что гарнисаж ГII, толщина которого не превышает 10–15 см, образуется только в период выдувки печи и не определяет/не обеспечивает срок службы футеровки горна ДП.

Следует отметить, что в процессе разборки ДП № 2 установлено: толщина футеровки и гарнисажа на стенках горна, противоположных стороне чугунных леток, составляла 940–1290 мм, а также и разгар лещади (двух рядов из трех верхних) был “удовлетворительным”, что позволило бы продолжать эксплуатацию печи. Однако в районе чугунных леток футеровка практически отсутствовала, печь работала “на гарнисаже”. В этом районе наблюдались нерегулярные, беспорядочные выделения металла и шлака (брекчиевидная структура) и “заливы” металла в слой засыпки на холодильниках (см. рис. 8, в; 11, в).

печи, — гарнисаж “вторичный”, сформировавшийся при выдувке.

2. Гарнисаж состоит из шлаковых включений, металла и углерода. При этом количество шлаковой составляющей максимально в верхней части горна и уменьшается до нескольких про-

центров уже на уровне около 300 мм ниже уровня летки. Гарнисаж в нижней части горна на боковых стенках состоит только из металла и углерода.

3. Выделения металла в гарнисаже слоистые, ориентированные, как правило, в вертикальной плоскости.

4. Общая толщина “вторичного” гарнисажа не превышает 100–150 мм, а толщина металла в нем может достигать 30–50 мм.

5. Толщина “первичного” гарнисажа — от 800 и до 1200 мм; структура слоистая; в матрице из углерода включения шлака и каплевидных, пластинчатых выделений металла.

6. Толщина выделений металла уменьшается от внутренней поверхности гарнисажа, контактирующей с расплавом, к внешней.

7. В “перерожденной футеровке” — металл в виде тончайших, беспорядочно ориентированных лейстов.

8. Металл в составе включений, как правило, по химическому составу приближается к составу углеродистой стали. Однако в матрице из феррита (твердый раствор внедрения С в α -железе)

обнаружен перлит (эвтектоидная смесь феррита и цементита), а также выделения графита пластинчатой формы. По данным микронзондового анализа, в металле гарнисажа можно обнаружить “уникальные” сплавы железа с углеродом, кремнием, а также фосфиды и сульфиды железа.

9. Углерод идентифицирован как графит, однако в составе “первичного” гарнисажа структура углерода изменяется (исследования этой “аморфизированной” структуры будут продолжены).

10. Соединения титана (TiO_2 , TiN) в гарнисаже обнаружены в незначительных количествах (менее 2 %); поэтому их роль и влияние на гарнисажеобразование и продление кампании печей не может быть признана определяющей.

10. Следует отметить, что толщина гарнисажа на стенках горна была достаточной для продолжения кампании. Однако в районе леток печь при полном отсутствии футеровки работала “на гарнисаже”, что обусловлено недостаточным качеством леточных масс и попаданием воды в печь из леточных холодильников.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. 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.
3. Иванов А.В., Журавлев Д.Л., Близнюков А.С. и др. Исследование состава гарнисажа горна доменной печи Саткинского чугуноплавильного завода (Сообщение 3) // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 5. С. 36–46.
4. Shinotake A., Nakamura H., Yadoumaru N. etc. Investigation of blast-furnace hearth sidewall erosion by core sample analysis and consideration of campaign operation // ISIJ International. 2003. Vol. 43. № 3. P. 321–330.
5. Сладков А.М., Кудрявцев Ю.П. Алмаз, графит, карбин — аллотропные формы углерода // Природа. 1969. № 5. С. 37–44.
6. Веселовский В.С. Графит. 2-е изд. — М.: Металлургия, 1960. — 180 с.
7. Исследование углерода — успехи и проблемы / Отв. ред. Ю.Н. Бубнов // Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН. — М.: Наука, 2007. — 206 с.
8. Химия гиперкоординированного углерода / Дж. Ола, Г.К.С. Пракаш, Р.Е. Уильямс и др. — М.: Мир, 1990. — 336 с.
9. Сладков А.М. Карбин — третья аллотропная форма углерода / Отв. ред. Ю.Н. Бубнов. — М.: Наука, 2003. — 151 с.
10. Чернозатонский Л.А., Сорокин П.Б. Углеродные нанотрубки: от фундаментальных исследований к нанотехнологиям / Под ред. Ю.Н. Бубнова. — М.: Наука, 2007. — С. 154–174.
11. Ивановский В.И. Технический углерод. Процессы и аппараты: Учебное пособие. — Омск: ОАО “Техуглерод”, 2004. — 228 с.
12. Берёзкин В.И. Углерод: замкнутые наночастицы, макроструктуры, материалы. — СПб.: АРТЭГО, 2013. — 450 с.
13. Жемчужников Ю.А., Гинзбург А.И. Основы петрографии углей. — М.: изд-во АН СССР, 1960. — 185 с.
14. Ковтун Г.П., Веревкин А.А. Наноматериалы: технологии и материаловедение. Обзор. — Харьков: ННЦ ХФТИ, 2010. — 73 с.
15. Металлургия чугуна / Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев и др. — М.: Академкнига, 2004. — 774 с.
16. Металлография железа. Т. II. Структура сталей (с атласом микрофотографий) / Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1972. — 284 с.
17. Кубашевски О. Диаграммы состояния двойных систем на основе железа: Справочник / пер. с англ. — М.: Металлургия, 1985. — 184 с.
18. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: Справочник / О.А. Банных, П.Б. Будберг, С.П. Алисова и др. — М.: Металлургия, 1986. — 440 с.
19. Вол А.Е. Строение и свойства двойных металлических систем. Т. II. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962. — 982 с.
20. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т. Т. I / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. — М.: Машиностроение, 1996. — 992 с.
21. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. — М.: Машиностроение, 1990. — 528 с.

22. Гиршович Н.Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. — М.-Л.: Машиностроение, 1966. — 562 с.
23. Справочник по чугунному литью. Изд. 3-е пер. и доп. / Под ред. Н.Г. Гиршовича. — Л.: Машиностроение, 1978. — 758 с.
24. Гольдштейн Я.Е., Мизин В.Г. Модифицирование и микролегирование чугуна. — М.: Металлургия, 1986. — 272 с.
25. Tachimori M., Ohno J., Nakamura M. etc. Flow of Iron in Blast Furnace Hearth // *Tetsu-to-Hagane*. 1984. Vol. 70. № 16. P. 2224–2231.
26. Li Yang-long, Cheng Shu-sen, Zhang Peng, Zhou Sheng-hua. Sensitive influence of floating state of blast furnace deadman on molten iron flow and hearth erosion // *ISIJ International*. 2015. Vol. 55. № 11. P. 2332–2341.

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

Report 1

A. M. KOVERZIN¹, blast furnace shop manager;
V. G. SCHIPIZYN¹, chief technology specialist of blast furnace shop;
A. V. VASCHENKO¹, chief maintenance specialist;
A. S. BLIZNYUKOV², PhD (Tech), technical director, a.s.bliznyukov@mail.ru;
M. R. SADRADINOV², director; A. R. MAKAVETSKAS³, leading engineer
of Resources-saving technologies of mineral raw materials processing;
YU. A. FISCHENKO³, I category engineer of Resources-saving technologies of mineral raw materials processing
(¹ JSC EVRAZ ZSMK, Russia, Kemerov rgn., Novokuznetsk;
² OJSC TD “Karbon-Shungit Trade”, Russia, Sverdlovsk rgn., Ekaterinburg,
³ National Research Technical University MISiS, Russia, Moscow)

Abstract. Results of study of lining and scull of the hearth of blast furnace No. 2 of JSC EVRAZ ZSMK presented, done after BF stop for major overhaul. It was determined, that the scull has a zonal structure, due to different conditions of the forming of it during the furnace running and blowing-down. The scull consists of isolations of graphite, metal and slag inclusions having distinctly lamellar structure. Number of slag inclusions in the scull of the hearth walls lower the hot metal tap hole is not big and sharply arises in samples at levels above the tap hole. In metal structure within the scull ferrite (α -Fe) prevails, also there are some lamellar graphite isolations and perlit. Quantity and thickness of metal isolations in the samples increases from the scull periphery to the center of blast furnace (from 20–30% and tens of microns to 70–90% (mass) and 30–50 microns correspondently) and decreases from the lower part of the hearth wall to the upper one. Titanium nitride (osbornite) TiN and titanium oxide (rutile) TiO₂, sulfides of calcium, iron, manganese, silicon carbide SiC present in the scull in a small quantity (less 2%). In samples taken higher the hot metal tap hole, in the scull slag isolations there are a considerable amount of alkali metals oxides and sulfides, and phosphide and iron sulfides were exhibited in the metal phase. It speaks about considerable evaporation/sublimation of compositions of potassium, sodium, Sulphur and phosphorus in the blast furnace hearth following by their condensation/crystallization at the cooled lining of hearth walls.

Key words: blast furnace; lining; scull; scull composition; slag isolations in scull; metal phase of scull.

For citation: Koverzin A.M., Schipizyn V.G., Vaschenko A.V., Bliznyukov A.S., Sadradinov M.R., Makavetskas A.R., Fischenko Yu.A. Study of scull and lining in the hearth of blast furnace No. 2 of JSC EVRAZ ZSMK (Report 1). *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 8, pp. 17–29. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-8-17-29

REFERENCES

1. Bliznyukov A.S., Sadradinov M.R., Makavetskas A.R., Fishhenko Yu.Yu. Study of blast furnace hearth lining (Report 2). *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 2, pp. 37–43. (In Russ.).
2. Bliznyukov A.S., Feshhenko S.A., Kurunov I.F., Korovushkin V.V. Study of blast furnace hearth lining (Report 1). *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2010, no. 9, pp. 31–36. (In Russ.).
3. Ivanov A.V., Zhuravlev D.L., Bliznyukov A.S., Sadradinov M.R., Makavetskas A.R., Fishhenko Yu.Yu., Bliznyukov E.A. Study of scull composition of hearth scull of a blast furnace of Satka iron-making plant (Report 3). *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 5, pp. 36–46. (In Russ.).
4. Shinotake A., Nakamura H., Yadoumaru N. etc. Investigation of blast-furnace hearth sidewall erosion by core sample analysis and consideration of campaign operation. *ISIJ International*, 2003, vol. 43, no. 3, pp. 321–330.
5. Sladkov A.M., Kudryavcev Yu.P. Diamond, graphite, carbide – allotropic carbon forms. *Priroda*, 1969, no. 5, pp. 37–44. (In Russ.).
6. Veselovskij V.S. *Grafit* [Graphite]. 2nd ed. Moscow: Metallurgiya, 1960, 180 p. (In Russ.).
7. *Issledovanie ugleroda — uspehi i problemy* [Study of graphite – successes and problems]. Bubnov Yu.N. ed. Institut e'lementoorganicheskix soedinenij im. A.N. Nesmeyanova RAN. Moscow: Nauka, 2007, 206 p. (In Russ.).
8. Ola J., Prakash G.K.S., Williams R.E. etc. *Ximiya giperkoordinirovannogo ugleroda* [Chemistry of hyper-coordinated carbon]. Moscow: Mir, 1990, 336 p. (In Russ.).
9. Sladkov A.M. *Karbin — tret'ya allotropnaya forma ugleroda* [Carbide – the third allotropic form of carbon]. Bubnov Yu.N. ed. Moscow: Nauka, 2003, 151 p. (In Russ.).

10. Chernozatonskij L.A. Sorokin P.B. *Uglerodny'e nanotrubki: ot fundamental'ny'x issledovanij k nanoteknologiyam* [Carbon nano-pipes: from fundamental study to nanotechnologies]. Bubnov Yu.N. ed. Moscow: Nauka, 2007, pp. 154–174. (In Russ.).
11. Ivanovskij V.I. *Texnicheskij uglerod. Processy' i apparaty': Uchebnoe posobie* [Technical carbon. Processes and apparatus. Tutorial]. Omsk: OAO "Texuglerod", 2004, 228 p. (In Russ.).
12. Beryozkin V.I. *Uglerod: zamknuty'e nanochasticy, makrostruktury', materialy'* [Carbon: closed nanoparticles, macrostructures, materials]. St. Petersburg: ARTE'GO, 2013, 450 p. (In Russ.).
13. Zhemchuzhnikov Yu.A., Ginzburg A.I. *Osnovy' petrografii uglej* [Foundation of coals petrography]. Moscow: izd-vo AN SSSR, 1960, 185 p. (In Russ.).
14. Kovtun G.P., Verevkin A.A. *Nanomaterialy': texnologii i materialovedenie. Obzor* [Nanomaterials: technology and material science]. Xar'kov: NNCz XFTI, 2010, 73 p.
15. Vegman E.F., Zhrebina B.N., Poxvisnev A.N. etc. *Metallurgiya chuguna* [Metallurgy of hot metal]. Moscow: Akademkniga, 2004, 774 p. (In Russ.).
16. *Metallografiya zheleza. T. II. Struktura stalej (s atlasom mikrofotojografij)* [Metal science of iron. Vol. II. Structure of steels (with atlas of pictures)]. Moscow: Metallurgiya, 1972, 284 p. (In Russ.).
17. Kubashevskij O. *Diagrammy' sostoyaniya dvojny'x sistem na osnove zheleza: Spravochnik* [Diagrams of state of double systems based on iron: Reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 184 p. (In Russ.).
18. Banny'x O.A., Budberg P.B., Alisova S.P. etc. *Diagrammy' sostoyaniya dvojny'x i mnogokomponentny'x sistem na osnove zheleza: Spravochnik* [Diagrams of state of double and multicomponent systems based on iron: Reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 440 p. (In Russ.).
19. Vol A.E. *Stroenie i svoystva dvojny'x metallicheskich sistem* [Composition and properties of double metal systems]. Moscow: Gos. izd-vo fiz.-mat. lit., 1962, vol. 2, 982 p. (In Russ.).
20. *Diagrammy' sostoyaniya dvojny'x metallicheskich sistem: Spravochnik* [Diagrams of state of double metal systems: Reference book, 3 volumes]. Lyakishev N.P. ed. Moscow: Mashinostroenie, 1996, vol. 1, 992 p. (In Russ.).
21. Laxtin Yu.M., Leont'eva V.P. *Materialovedenie* [Material science]. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 528 p. (In Russ.).
22. Girshovich N.G. *Kristallizaciya i svoystva chuguna v otlivkax* [Crystallization and properties of cast iron in ingots]. Moscow–Leningrad: Mashinostroenie, 1966, 562 p. (In Russ.).
23. *Spravochnik po chugunnomu lit'yu* [Reference book on hot metal founding]. 3rd ed., Girshovich N.G. ed. Leningrad: Mashinostroenie, 1978, 758 p. (In Russ.).
24. Gol'dshtejn Ya.E., Mizin V.G. *Modificirovanie i mikrolegirovanie chuguna* [Modification and microalloying of hot metal]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 272 p. (In Russ.).
25. Tachimori M., Ohno J., Nakamura M. etc. Flow of Iron in Blast Furnace Hearth. *Tetsu-to-Hagane*, 1984, vol. 70, no. 16, pp. 2224–2231.
26. Li Yang-long, Cheng Shu-sen, Zhang Peng, Zhou Sheng-hua. Sensitive influence of floating state of blast furnace deadman on molten iron flow and hearth erosion. *ISIJ International*, 2015, vol. 55, no. 11, pp. 2332–2341.