ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРУЕМОСТИ ПРОДУКТОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ЧЕРЕЗ КОКСОВУЮ НАСАДКУ

*А. Ю. ЧЕРНАВИН, ведущий инженер;
В. А. КОБЕЛЕВ, канд. техн. наук, ведущий инженер, kobelev_va@inbox.ru;
Д. А. ЧЕРНАВИН, инженер; Г. А. НЕЧКИН, канд. техн. наук, ведущий инженер
(ООО “Промышленные инновационные технологии национальной
коксохимической ассоциации” (ООО “Проминтех НКА”), Россия, г. Екатеринбург)*

Аннотация. Одним из путей интенсификации доменной плавки является повышение газопроницаемости нижней части столба шихтовых материалов. Фильтруемость промежуточного шлака через коксовую насадку определяет газопроницаемость нижней зоны и ход доменной плавки. Для изучения фильтруемости была разработана и освоена методика, позволяющая достоверно оценивать поведение железорудного сырья в доменной печи при высоких температурах. Лабораторными исследованиями установлено влияние на фильтруемость расплава доменного шлака вводимых в аглошихту MgO , MnO и CaO в зависимости от их минералогического состава. Положительное влияние оксида магния на фильтруемость шлака имеет экстремальный характер, при этом существенное влияние оказывает основность агломерата. Минеральная форма вводимых в аглошихту магнийсодержащих добавок существенно влияет на фильтруемость продуктов плавки в доменной печи. Замена сидерита и доломита на другие виды магнийсодержащих материалов способствует улучшению фильтруемости шлака через коксовую насадку. Эффективным средством улучшения фильтруемости продуктов плавки агломерата через коксовую насадку является дополнительный ввод в агломерационную шихту марганца в виде марганцевого известняка или марганецсодержащего ферритнокальциевого флюса. Переход на выплавку чугуна из офлюсованных окатышей и агломерата будет способствовать повышению фильтруемости продуктов плавки за счет близких физико-химических свойств компонентов доменной шихты в части плавления и фильтрации шлака через коксовую насадку.

Ключевые слова: доменная плавка, агломерат, окатыши, коксовая насадка, оксид марганца, оксид магния, физико-химические свойства шлака, минеральный состав, фазовый состав, фильтруемость продуктов плавки.

Ссылка для цитирования. Чернавин А.Ю., Кобелев В.А., Чернавин Д.А., Нечкин Г.А. Исследование фильтруемости продуктов доменной плавки через коксовую насадку // Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 3. С. 315–321.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-3-315-321

STUDY OF BLAST FURNACE HEAT FILTERABILITY THROUGH COKE FILLING

*A. YU. CHERNAVIN, Leading Engineer;
V. A. KOBELEV, PhD (Tech), Leading Engineer, kobelev_va@inbox.ru;
D. A. CHERNAVIN, Engineer; G. A. NECHKIN, PhD (Tech), Leading Engineer
(OJSC “Industrial innovation technologies of national coke association”
(OJSC “Promintech NKA”), Russia, Ekaterinburg)*

Abstract. Increase of gas permeability of burden materials column lower part is one of the way of blast furnace heat intensification. Filterability of intermediate slag through coke filling determines the gas permeability of the lower zone and the blast furnace heat running. To study the filterability a methodology was elaborated and implemented, which enabled to estimate reliably the iron ore raw materials behavior in the blast furnace at high temperatures. By laboratory studies influence on the filterability of BF slag melt was determined, when MgO , MnO and CaO adding to the burden, depending on the oxides mineralogical composition. The positive influence of magnesium oxide on the slag filterability has an extreme character, at that the sinter basicity has a considerable influence. The mineral form of magnesium-containing additives introduced into the burden substantially influenced the filterability on heat products in blast furnace. Replace of siderite and dolomite by other magnesium-containing materials facilitates to improving of slag filterability through coke filling. Additional input of manganese in the form of manganese limestone or manganese-containing ferritic-calcium flux is an effective mean to improve filterability of sinter smelting products through coke filling. Transfer to hot

metal smelting from fluxed pellets and sinter will facilitate heat products filterability increase thanks to close physical and chemical properties of BF burden components in respect of smelting and slag filtering through coke filling.

Key words: blast furnace heat, sinter, pellets, coke filling, manganese oxide, magnesium oxide, physical and chemical properties of slag, mineral composition, phase composition, heat products filterability.

For citation. Chernavin A.Yu., Kobelev V.A., Chernavin D.A., Nechkin G.A. Study of blast furnace heat filterability through coke filling. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 3, pp. 315–321. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-3-

В процессе доменной плавки шихтовые материалы подвергаются воздействию газа-восстановителя, механических нагрузок и высоких температур в постоянно меняющихся во времени и пространстве условиях. Наличие максимально полных сведений о поведении железорудных материалов в процессе доменной плавки позволяет интенсифицировать и более оперативно управлять доменным процессом.

Оценка качества железорудного сырья в доменном производстве осуществляется по химическому составу, количеству мелочи класса 0–5 мм и исходной прочности по ГОСТ 15137–77. Эти показатели хотя и достаточно сильно влияют на газодинамику столба шихтовых материалов в печи, однако в полной мере не отражают особенности физико-химических процессов, определяющих показатели работы доменных печей. В частности, отсутствие сведений о высокотемпературных свойствах железорудных материалов не позволяет технологам оптимизировать работу нижней части доменной печи и сохранять высокую дренажную способность коксовой насадки.

Ранее сформированные представления о строении столба материалов в области высоких температур печи [1, 2] и теория “определяющих зон” М.А. Стефановича [3, 4] активизировали разработку методик исследования высокотемпературных свойств как исходного сырья, так и жидких продуктов плавки [5–7].

В настоящее время при разработке компьютерных моделей доменного процесса активно используются понятия о температурах начала, конца и интервале плавления железорудных материалов, об их горячей прочности, расположении и форме зоны когезии [8, 9]. Но все эти характеристики не достаточно точно описывают происходящие в высокотемпературной зоне процессы. При этом, например, обсуждение свойств шлака невозможно без привлечения свойств материала, с которым шлак находится в контакте и

взаимодействует. Поэтому появились и комплексные характеристики высокотемпературного поведения материалов: показатель нагрузки коксовой насадки расплавом [10], плотность орошения жидкими продуктами плавки [11], фильтруемость продуктов плавки через коксовую насадку [12], а также условная вязкость железорудного сырья [5].

Фильтруемость — отношение массы продуктов плавки (металла и шлака), прошедших через коксовую насадку, к общей массе продуктов плавки (исходных металла и шлака) [3]. Для изучения фильтруемости была разработана и освоена методика, позволяющая достоверно оценивать поведение железорудного сырья в доменной печи при высоких температурах [13].

До сих пор рассматривался вопрос об орошении сухой насадки расплавом из внешнего источника. Однако в общем случае, особенно когда используются два вида железорудного сырья — агломерат и окатыши, имеющие разные температурные характеристики размягчения и плавления, расплав по месту выделения (внешний и внутренний источники) различается и по-разному влияет на сопротивление насадки течению потоков, поскольку обладает и различной склонностью к выделению остатка в самостоятельную фазу и его ликвидации. По словам Б.В. Ипатова, “...величина остатка является важнейшей характеристикой фильтруемости шлаков и особенно титансодержащих расплавов. Задержка шлака в последнем случае приводит к накоплению в слое кокса твердых карбонитридов и в конечном счете к потере дренажной способности горна” [14].

Но, как правило, с фильтруемостью промежуточного шлака через коксовую насадку связаны основные трудности ведения доменной плавки, при этом известно и общепризнано влияние степени офлюсования по CaO/SiO_2 , концентраций MgO и MnO на плавкость и вязкость расплава конечных доменных шлаков [15, 16].

Влияние содержания и минеральной формы MgO на фильтруемость продуктов плавки

Для оценки влияния содержания MgO на фильтруемость продуктов плавки лабораторные агломераты, полученные из шихт с различным содержанием MgO , изменение содержания MgO в агломерате производили путем изменения доли бакальского сидерита в аглошихте. В каче-

стве коксовой насадки использовали газифицированный промышленный кокс фракции 10–15 мм. Показатели лабораторного процесса фильтрации через кокс продуктов плавления агломератов приведены в таблице.

INDICES OF SINTERS FILTRATION THROUGH COKE FILLING

Вид сырья	Степень фильтруемости продуктов плавки, %	Степень фильтруемости шлака, %	Интенсивность орошения коксовой насадки		Содержание в агломерате, %		Основность CaO/SiO ₂
			г/(см ² ·мин)	т/(м ² ·ч)	MgO	MnO	
M1	90,9	57,1	0,556	0,927	1,71	0,29	1,60
M2	94,6	69,5	0,540	0,901	1,70	0,60	1,60
M3	94,1	17,5	0,970	1,616	2,84	0,48	1,36
M4	95,7	25,4	0,666	1,110	2,84	0,79	1,36
M5	93,7	74,7	0,859	1,432	2,62	1,03	2,20
M6	91,1	67,7	1,130	1,884	3,01	0,99	2,20

Положительное влияние оксида магния на фильтруемость шлака имеет экстремальный характер, при этом существенное влияние оказывает основность агломерата. При основности в диапазоне 1,0–1,4 продукты плавки образуют вспененную массу, запирающую коксовую насадку, вследствие чего такие шихты имеют неудовлетворительную фильтруемость (M3) или не фильтруются вообще. При дополнительном вводе марганца в состав агломерата и повышении основности (M5) с 1,8 до 2,2 некоторое увеличение содержания MgO не приводит к заметному ухудшению фильтруемости продуктов плавки через коксовую насадку. Положительное влияние оказывает ввод в аглошихту марганцевой руды для агломератов (M2) на основе базового состава железорудной части (M1) и при увеличении в шихте доли MgO (M5). Ввод марганцевой руды в базовую аглошихту увеличил степень фильтрации продуктов плавки на 4,1 % (отн.), шлака — на 21,7 % (отн.). Подобное влияние можно проследить и на шихтах с повышенным содержанием MgO: в среднем степень фильтруемости продуктов плавки увеличилась на 2,1 % (отн.), шлака — на 25,1 % (отн.).

Рис. 1. Влияние количества и вида магнезиальных добавок на фильтруемость первичного шлака через коксовую насадку

Fig. 1. Influence of quantity and kinds of magnesium additives on filterability of primary slag through coke filling

Для определения влияния магнезиальных добавок на фильтруемость первичного шлака было проведено исследование фильтруемости агломератов с основностью (CaO/SiO₂) = 1,25 и содержанием Al₂O₃ 2,8 %. Оксид магния в агломерационную шихту вносился различными магнезиальными добавками: доломитом, дунитом, сидеритом и специально подготовленным марганецсодержащим ферритнокальциевым флюсом (аглофлюсом) [17]. Результаты исследования приведены на рис. 1.

Анализ рис. 1 показывает разный характер влияния на фильтруемость продуктов плавки и особенно шлака различных типов магнезиальных добавок и обусловлен различными минеральными формами, непосредственно влияющими на поведение оксидов при формировании минеральной структуры агломерата. В сидерите Mg²⁺ не может переходить в силикаты, поскольку связан с железом, и в процессе плавления вначале плавится железо, потом — тугоплавкий магний, который адсорбируется на коксе в виде отдельной тугоплавкой оксидной фазы. Образование этой фазы и предопределяет самую низкую фильтруемость шлака через коксовую насадку из исследованных магнезиальных добавок. Механизмы фильтрации дунита и доломита схожи: Mg²⁺ в отличие от сидерита изначально изоморфно не входит в кристаллическую решетку железа и в процессе химических превращений образует соединения (форстерит, магнезиоферрит, монтичеллит и т. д.), способные образовывать низкоплавкие эвтектики. Этим и обуславливаются близкие с дунитом показатели фильтруемости шлака и более высокие показатели фильтруемости по отношению к сидериту. Агломерационный флюс, являясь искусственным флюсом, содержит связанный в маложелезистом силикате магний, при этом проявляется высокая способность оксида магния входить в состав легкоплавких силикатов, и этот вид магнезиальной добавки показал самую высокую фильтруемость шлака через коксовую насадку.

Таким образом, замена сидерита и доломита на другие виды магнийсодержащих материалов

способствует существенному улучшению фильтруемости шлака через коксовую насадку.

Ухудшение фильтруемости шлака через кокс связано с процессами, происходящими на поверхности раздела шлак – кокс. После исследования фильтрации продуктов плавки куски кокса с оставшимся шлаком изучали с помощью микрорентгеноспектрального анализа.

На рис. 2 приведено изображение микроструктуры поверхности раздела кокс – шлак в режиме наложения цветов и обозначены характерные фазы. Рентгеноспектральный анализ показал, что фазы 1 и 3 практически идентичны и представляют собой шлак на основе оксидов кальция, кремния, алюминия и магния. Фазы 4–6 — карбиды и оксикарбиды титана. Особо нужно отметить фазу 2, состоящую из практически чистого оксида магния. Механизм осаждения шлака на поверхности кокса представляется следующим. Первыми продуктами взаимодействия шлака с коксом являются карбиды титана и кремния, затем кристаллизуется оксид магния, образуя дендриты, которые связывают силикатный расплав вблизи поверхности кокса и в его порах [18]. Разная минералогическая форма вводимого магния определяет различия в механизме кристаллизации его оксида на коксе, при этом концентрация MgO в железорудных материалах не влияет на его поведение при фильтрации расплава. В одном случае магний кристаллизуется в виде силикатов, в другом — образует отдельную тугоплавкую фазу MgO.

Рис. 2. Идентификация фаз на поверхности раздела кокс – шлак

Fig. 2. Identification of phases at the surface of border coke – slag

При нормальной работе доменной печи зона орошаемой коксовой насадки, имея значительные резервы по фильтрации расплава, не может служить лимитирующим звеном интенсивного ведения процесса до тех пор, пока в локальном объеме насадки не сформируется избыток остатка адгезионного типа (в данном случае MgO), который является побудителем процесса формирования твердого остатка [19]. В этом случае задержка расплава приведет к развитию контактных химических реакций с образованием газонасыщенных вязких и твердых масс, резко ухудшающих дренажную способность горна.

Влияние содержания и минеральной формы марганцевых добавок на фильтруемость продуктов плавки

Рис. 3. Влияние количества и вида марганцевых добавок на фильтруемость первичного шлака через коксовую насадку

Fig. 3. Influence of quantity and kinds of manganese additives on filterability of primary slag through coke filling

Для определения влияния количества и вида марганцевых добавок на процессы фильтрации продуктов плавки агломератов через коксовую насадку было проведено исследование по той же методике. Во всех опытах в качестве коксовой насадки использовали предварительно газифицированный промышленный кокс. Оксид марганца в аглошихту вводили четырьмя различными материалами: марганцевой рудой, марганцевым концентратом, марганцевым известняком и специально подготовленным марганецсодержащим ферритнокальциевым флюсом. Показатели фильтруемости первичного шлака приведены на рис. 3.

Повышение содержания оксида марганца в агломерате улучшает фильтруемость первичного шлака, причем только в том случае, если марганец в аглошихту вносится в виде марганецсодержащего ферритнокальциевого флюса и марганцевого известняка. Эффективность действия марганца достигается за счет повышения

жидкотекучести при взаимодействии шлака с коксом. Шлак из агломератов, полученных с использованием ферритнокальцевого флюса, фильтруется практически в 1,5–2 раза лучше, чем аналогичный по химическому составу агломерат с добавкой силикатной марганцевой руды. Механизм влияния марганца на процесс осаждения шлака на коксе, вероятно, связан с блокированием

реакции образования карбидов титана и кремния и их осаждения на поверхности кокса [20].

Таким образом, эффективным средством улучшения фильтруемости продуктов плавки через коксовую насадку является дополнительный ввод в агломерационную шихту марганца в виде марганцевого известняка или марганцесодержащего ферритнокальцевого флюса.

Влияние степени офлюсования по CaO/SiO_2 на фильтруемость шлакового расплава

Влияние степени офлюсования по CaO/SiO_2 на фильтруемость шлакового расплава исследовали применительно к окатышам и агломерату Качканарского ГОКа. Оксид кальция в шихту окатышей и агломерата вводили тремя различными материалами: известняком, известью и специально подготовленным ферритнокальцевым флюсом. Результаты исследования влияния основности окатышей и агломерата на фильтруемость шлака через коксовую насадку приведены на рис. 4 и 5.

Рис. 4. Влияние основности окатышей на фильтруемость первичного шлака через кокс

Fig. 4. Influence of pellets basicity on filterability of primary coke through coke

Офлюсованные агломераты восстанавливаются, плавятся и фильтруются лучше, т. е. быстрее и полнее, чем неофлюсованные окатыши. Шлаковая часть неофлюсованных окатышей при плавке практически не фильтруется через коксовую насадку. Основу нефилтрующихся масс составляет кремнезем с магнием, глиноземом и оксидом титана. Нефильтрующиеся массы из кокса не удаляются с ростом температуры и времени, а лишь трансформируются в карбиды (SiC , TiC и др.). Нефильтрующиеся массы закупоривают коксовую насадку от 25 до 75 % объема межкускового пространства и создают главные потери напора газов, снижают извлечение железа, ванадия, вызывают перерасход кокса

[21]. Повышение основности окатышей и агломерата повышает фильтруемость шлака через коксовую насадку, при этом наиболее эффективно это происходит при офлюсовании и окатышей, и агломерата ферритнокальцевым флюсом.

Рис. 5. Влияние основности агломерата на фильтруемость шлака через кокс

Fig. 5. Influence of sinter basicity on filterability of coke through coke

Выплавка чугуна с использованием неофлюсованных окатышей имеет осложнение в нижней части печи, связанное с образованием тугоплавких первичных шлаков, и, как показали исследования, ввод марганцевого концентрата в шихту неофлюсованных окатышей не способствует улучшению фильтруемости шлака. При работе доменных печей на разноосновном сырье повышается газодинамическая напряженность нижней зоны, что сдерживает рост производства и снижение расхода кокса. Наиболее эффективным решением этой проблемы является переход на выплавку чугуна из офлюсованных окатышей и агломерата. В этом случае железорудные компоненты доменной шихты обладают близкими физико-химическими свойствами, особенно важными в части плавления и фильтрации шлака через коксовую насадку.

Помимо физико-химических свойств жидкой фазы важная роль в увеличении фильтруемости продуктов плавки через коксовую насадку и, как следствие, в увеличении интенсивности доменной плавки принадлежит самой коксовой на-

садке, на поверхности кусков которой (при взаимодействии со шлаком и газовым потоком) протекают физические процессы и химические реакции.

Заключение

Одним из путей интенсификации доменной плавки является повышение газопроницаемости нижней части столба шихтовых материалов. Это может быть достигнуто путем улучшения физико-химических свойств жидкой фазы, т. е. увеличением подвижности и физико-химических свойств шлака сразу после его расплавления за счет изменения химического состава железорудной шихты.

Исследование фильтруемости продуктов плавки восстановленных компонентов доменной шихты через коксовую насадку показало, что состав агломерата существенно влияет на фильтруемость продуктов плавки, и особенно шлака, через коксовую насадку.

Положительное влияние оксида магния на фильтруемость шлака имеет экстремальный характер, при этом существенное влияние оказывает основность агломерата. Минеральная форма вводимых в аглошихту магнийсодержа-

щих добавок существенно влияет на фильтруемость продуктов плавки в доменной печи. Замена сидерита и доломита на другие виды магнийсодержащих материалов способствует улучшению фильтруемости шлака через коксовую насадку.

Эффективным средством улучшения фильтруемости продуктов плавки агломерата через коксовую насадку является дополнительный ввод в агломерационную шихту марганца в виде марганцевого известняка или марганецсодержащего ферритнокальциевого флюса.

Переход на выплавку чугуна из офлюсованных окатышей и агломерата будет способствовать повышению фильтруемости продуктов плавки за счет близких физико-химических свойств компонентов доменной шихты в части плавления и фильтрации шлака через коксовую насадку.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуденау Г.В., Крайбих К., Номия Е. Влияние пластической зоны на распределение газового потока в доменной печи // *Черные металлы*. 1979. № 22. С. 7–13.
2. Пат. 470113484 Японии, МКИ С 21 В 5/00; НК 10J121 Способ оптимальной работы доменной печи с регулированием зон размягчения и плавления (заявка № 520724). Син Ниппон сэйтэцу к. к. // Заявл. 14.11.72; опубл. 10.01.77 г., № 2019.
3. Стефанович М.А. Состояние процессов в доменных печах. — В кн.: Достижения доменщиков Магнитогорского металлургического комбината / Под ред. А.М. Банных. — М.: Металлургиздат, 1957. С. 16–35.
4. Стефанович М.А. Анализ хода доменного процесса. — Свердловск: Металлургиздат, 1960. — 286 с.
5. Шатоха В.И. Процессы плавления и шлакообразования и их роль в доменной плавке. — В кн.: Познание процессов доменной плавки / Под ред. В.И. Большакова, И.Г. Товаровского. — Днепропетровск: Пороги, 2006. С. 227–247.
6. Бургхардт О., Кортман Г. Испытание шихтовых материалов для прямого восстановления // *Черные металлы*. 1980. № 24. С. 3–8.
7. Товаровский И.Г., Гладков Н.А., Нестеров А.С. Особенности формирования расплава в условиях малококсовой доменной плавки // *Сталь*. 1994. № 2. С. 7–12.
8. Дмитриев А.Н. Математическое моделирование доменного процесса. — Екатеринбург: УрО РАН, 2011. — 162 с.
9. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев и др.; под ред. Н.А. Спирина. — Екатеринбург: ООО УИПЦ, 2014. — 558 с.
10. Захаров И.Н., Фролов В.В., Ипатов Б.В. и др. Гидродинамика шлака в коксовых насадках / *Тр. Ин-та металлургии Уральского филиала АН СССР*. Вып. 24. Восстановление, теплообмен и гидродинамика в доменном процессе. Ч. 1. — Свердловск: РИСО УФАИ СССР, 1970. С. 71–119.
11. Андронов В. Н. К вопросу об интенсификации доменной плавки. — В кн.: Форсирование доменной плавки / Под ред. Н.И. Красавцева, А.А. Гиммельфарба. — М.: Металлургиздат, 1963. С. 140–152.
12. Нечкин Г.А., Кобелев В.А., Чернавин А.Ю., Чернавин Д.А. Фильтруемость доменных шлаков через коксовую насадку горна доменных печей // *Сб. науч. трудов V Междунар. конгресса по агло-коксо-доменному производству*, г. Ялта, Украина. 21–25 мая 2012 г. 2012. С. 362–370.
13. Чернавин А.Ю., Нечкин Г.А., Чернавин Д.А. и др. Моделирование поведения шихтовых материалов в нижней части доменной печи // *Сталь*. 2010. № 5. С. 20–23.
14. Ипатов Б.В. Некоторые особенности фильтрации шлаковых расплавов через коксовые насадки: Дис. ... канд. техн. наук. — Свердловск: Ин-т металлургии АН СССР. Уральский науч. центр, 1971. — 145 с.
15. Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н., Похвиснев А.Н., Юсфин Ю.С. Металлургия чугуна. — М.: Металлургия, 1978. — 480 с.
16. Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В.Е. Металлургия чугуна. — Киев: Вища школа, 1974. — 488 с.
17. Пат. 2465350 РФ, МПК С 22 В 1/14. Агломерационный флюс шихты и способ его производства / А.Ю. Чернавин, С.В. Филатов, В.В. Филиппов, А.Г. Сухарев // Заявл. 11.05.2010; опубл. 27.10.2012. Бюл. № 30.

18. Пузанов В.П., Кобелев В.А. Введение в технологии металлургического структурообразования. — Екатеринбург: УрО РАН, 2005. — 501 с.
19. Пузанов В.П., Нечкин Г.А., Онорин О.П. и др. О плотности орошения продуктами плавки коксовой насадки доменной печи // *Сталь*. 2012. № 4. С. 6–15.
20. Нечкин Г.А. Исследование влияния минерального структурообразования на металлургические свойства железорудных агломератов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Екатеринбург, ИМет УрО РАН, 2015. — 22 с.
21. Пузанов В.П., Нечкин Г.А., Птичников Г.А. и др. Основы работы противоточной коксовой насадки доменной печи (сообщение 2) // *Сталь*. 2012. № 11. С. 2–8.

Поступила 28 декабря 2018 г.

REFERENCES

1. Gudenau G.V., Kraibikh K., Nomiya E. The influence of plastic zone on the distribution of gas flow in a blast furnace. *Chernye metally*, 1979, no. 22, pp. 7–13. (In Russ.).
2. *Sposob optimal'noi raboty domЕННОй pechi s regulirovaniem zon razmyagcheniya i plavleniya* [A method of optimal operation of the blast furnace with the regulation of the zones of softening and melting]. Patent JP no. 470113484. IPC C 21 B 5/00. NPC 10J121. 1977, no. 2019.
3. Stefanovich M.A. *Sostoyaniye protsessov v domennykh pechakh* [The state of the processes in the blast furnaces]. *V kn.: Dostizheniya domenshchikov Magnitogorskogo metallurgicheskogo kombinata* [In book: Achievements of BF men of Magnitogorsk Metallurgical Combine]. Bannykh A.M. ed. Moscow: Metallurgizdat, 1957, pp. 16–35. (In Russ.).
4. Stefanovich M.A. *Analiz khoda domennogo protsessa* [Analysis of the progress of blast furnace process]. Sverdlovsk: Metallurgizdat, 1960, 286 p. (In Russ.).
5. Shatokha V.I. *Protsessy plavleniya i shlakooobrazovaniya i ikh rol' v domЕННОй plavke* [The processes of melting and slag formation, and their role in the blast smelting]. *V kn.: Poznanie protsessov domЕННОй plavki* [In book: Knowledge of blast smelting processes]. Bol'shakov V.I., Tovarovskii I.G. ed. Dnepropetrovsk: Porogi, 2006, pp. 227–247. (In Russ.).
6. Burgkhardt O., Kortman G. Test of Burden Materials for Direct Recovery. *Chernye metally*, 1980, no. 24, pp. 3–8. (In Russ.).
7. Tovarovskii I.G., Gladkov N.A., Nesterov A.S. Features of melt formation in low-coke blast furnace smelting conditions. *Stal'*, 1994, no. 2, pp. 7–12. (In Russ.).
8. Dmitriev A.N. *Matematicheskoe modelirovaniye domennogo protsessa* [Mathematical modeling of the blast furnace process]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2011, 162 p. (In Russ.).
9. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu. etc. *Matematicheskoe modelirovaniye metallurgicheskikh protsessov v ASU TP* [Mathematical modeling of metallurgical processes in the process control system]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: OOO UIPTs, 2014, 558 p. (In Russ.).
10. Zakharov I.N., Frolov V.V., Ipatov B.V. etc. *Gidrodinamika shlakа v koksovykh nasadkakh* [Slag hydrodynamics in coke filling]. *Tr. In-tа metallurgii Ural'skogo filialа AN SSSR. Vyp. 24. Vosstanovleniye, teploobmen i gidrodinamika v domennom protsesse. Ch. 1* [Proc. Institut Metallurgy of the Ural branch of the USSR Academy of Sciences. Issue 24. Recovery, heat transfer and hydrodynamics in the blast furnace process. Part 1]. Sverdlovsk: RISO UFAN SSSR, 1970, pp. 71–119. (In Russ.).
11. Andronov V.N. *K voprosu ob intensivifikatsii domЕННОй plavki* [On the question of the intensification of the blast furnace smelting]. *V kn.: Forsirovaniye domЕННОй plavki* [In book: Forcing the blast furnace melt]. Krasavtsev N.I., Gimmel'farb A.A. ed. Moscow: Metallurgizdat, 1963, pp. 140–152. (In Russ.).
12. Nechkin G.A., Koblelev V.A., Chernavin A.Yu., Chernavin D.A. *Fil'truemost' domennykh shlakov cherez koksovuyu nasadku gorna domennykh pechei* [The filterability of blast furnace slags through the coke filling of the hearth of blast furnaces]. *Sb. nauch. trudov V Mezhdunar. kongressа po aglo-kokso-domennomu proizvodstvu, g. Yalta, Ukraina. 21–25 maya 2012 g.* [Sat. scientific Proc. of the V Intern. Congress on coking-sintering and blast furnace process, Yalta, Ukraine. May 21–25, 2012]. 2012, pp. 362–370. (In Russ.).
13. Chernavin A.Yu., Nechkin G.A., Chernavin D.A. etc. Modeling the behavior of burden materials in the lower part of a blast furnace. *Stal'*, 2010, no. 5, pp. 20–23. (In Russ.).
14. Ipatov B.V. *Nekotorye osobennosti fil'tratsii shlakovykh rasplavov cherez koksovye nasadki: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Some features of the filtration of slag melts through coke filling. Cand. Sci. Dis.]. Sverdlovsk: In-t metallurgii AN SSSR. Ural'skii nauch. tsentr, 1971, 145 p. (In Russ.).
15. Vegman E.F., Zharebin B.N., Pokhvisnev A.N., Yusfin Yu.S. *Metallurgiya chuguna* [Hot metal metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 480 p. (In Russ.).
16. Efimenko G.G., Gimmel'farb A.A., Levchenko V.E. *Metallurgiya chuguna* [Hot metal metallurgy]. Kiev: Vishcha shkola, 197, 488 p. (In Russ.).
17. Chernavin A.Yu., Filatov S.V., Filippov V.V., Sukharev A.G. *Agglomeratsionnyi flyus shikhty i sposob ego proizvodstva* [Sintering flux of charge and method of its production]. Patent RF no. 2465350. IPC C 22 B 1/14. *Byulleten' izobretenii*, 2012, no. 30. (In Russ.).
18. Puzanov V.P., Koblelev V.A. *Vvedeniye v tekhnologii metallurgicheskogo strukturoobrazovaniya* [Introduction to the technology of metallurgical structure formation]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2005, 501 p. (In Russ.).
19. Puzanov V.P., Nechkin G.A., Onorin O.P., Koblelev V.A., Chernavin A.Yu. On the irrigation density of blast furnace filling by the products of BF smelting. *Stal'*, 2012, no. 4, pp. 6–15. (In Russ.).
20. Nechkin G.A. *Issledovaniye vliyaniya mineral'nogo strukturoobrazovaniya na metallurgicheskie svoystva zhelezorudnykh aglomeratov: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Investigation of the influence of mineral structure formation on the metallurgical properties of iron ore agglomerates. Extended Abstract of Sci. Diss.]. Ekaterinburg, IMet UrO RAN, 2015, 22 p. (In Russ.).
21. Puzanov V.P., Nechkin G.A., Ptichnikov G.A., Koblelev V.A., Chernavin A.Yu. The basics of countercurrent blast furnace coke filling operation (Report 2). *Stal'*, 2012, no. 11, pp. 2–8. (In Russ.).

Received 28 December 2018