

УДК 669.162.12.001.5

А. С. Нестеров, Л. И. Гармаш, К. П. Лопатенко, М. Г. Болденко,  
Н. В. Горбатенко, Э. И. Лытарь

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВОЙСТВ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

*Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины*

**Аннотация.** Целью исследования является моделирование в лабораторных условиях характера поведения железорудных материалов в зоне размягчения-плавления ДП и капельного течения с использованием комплексной методики, разработанной в Институте черной металлургии. Показано, что распространенное представление о формировании в доменной печи первичного шлакового расплава на основе FeO имеет место преимущественно в начальный период шлакообразования и справедливо для железорудных материалов низкой основности. Для окатышей характер формирования жидких фаз существенно отличается от агломерата. Экспериментально установлено изменение состава шлакового расплава по мере нагрева. Показано, что в условиях температурно-тепловой обработки сырья каждой температуре соответствует свой состав жидкой фазы. При проплавке окатышей первичный расплав формируется в температурном диапазоне 1330-1360<sup>0</sup>, в котором доля первичного шлака составляет 16-25%. Расплав из высококремнистой кусковой руды формируется при высоких температурах 1490-1520<sup>0</sup>. Масса первичного шлака с 42-48% FeO составляет 4-8% от массы железорудных материалов. Основная часть расплава зависит на коксовой насадке на слое кокса при температурах выше 1600<sup>0</sup>. Расплавы, образующиеся из смесей железосодержащих материалов, как правило, имеют усредненные характеристики. Обнаруженные закономерности дают возможность прогнозировать поведение и свойства многокомпонентных шихтовых смесей в доменной печи.

**Ключевые слова:** доменная печь, железорудные материалы, моделирование, температурно-тепловая обработка, восстановление, расплавы

**Ссылка для цитирования:** Нестеров А.С. Исследование высокотемпературных свойств железорудных материалов в лабораторных условиях / А.С. Нестеров, Л.И. Гармаш, К.П. Лопатенко, М.Г. Болденко, Н.В. Горбатенко, Э.И. Лытарь // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2018. - Вып.32. – С.64-79.

**Doi:**

*A.S. Nesterov, L.I. Garmash, K.P. Lopatenko, M.G. Boldenko, N.V. Gorbatenko, E.I. Lutar*

**The researches of high-temperature properties of iron materials in laboratory conditions**

*Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine*

**Abstract.** The aim of the study is to simulate in laboratory conditions the behavior of iron ore materials in the zone of softening-melting DP and drip flow using an integrated method developed at the Institute of Ferrous Metallurgy. It is shown that the widespread idea of the formation in the blast furnace of primary slag melt based on FeO

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2018. - Вып.32  
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2018. – Collection 32  
«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2018. – Vypusk 32

takes place mainly in the initial period of slag formation and is true for low basicity iron ore materials. For pellets, the nature of the formation of liquid phases differs significantly from the agglomerate. Experimentally established changes in the composition of the slag melt as heating. It is shown that under the conditions of temperature and heat treatment of raw materials, each temperature has its own composition of the liquid phase. When the pellets are melted, the primary melt is formed in the temperature range of 1330–1360<sup>0</sup>C, in which the proportion of primary slag is 16–25%. Melt from high-silicon lumpy ore is formed at high temperatures of 1490–1520<sup>0</sup>C. The mass of the primary slag with 42–48% FeO is 4–8% by weight of iron ore materials. The main part of the melt hangs on the coke nozzle on the coke layer at temperatures above 1600<sup>0</sup>C. Melts formed from mixtures of iron-containing materials, as a rule, have averaged characteristics. The observed patterns make it possible to predict the behavior and properties of multicomponent charge mixtures in a blast furnace.

**Keywords:** blast furnace, iron ore materials, modeling, temperature heat treatment, reduction, melts

**For citation:** Nesterov A.S. The researches of high-temperature properties of iron materials in laboratory conditions / A.S. Nesterov, L.I. Garmash, K.P. Lopatenko, M.G. Boldenko, N.V. Gorbatenko, E.I. Lutar // *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii»*. – 2018. – Vypusk 32. – P.64-79. (In Russ.).

**Doi:**

*O.C. Нестеров, Л.І. Гармаш, К.П. Лопатенко, М.Г. Болденко, Н.В. Горбатенко, Е.І. Литар*

**Дослідження високотемпературних властивостей залізородних матеріалів у лабораторних умовах**

*Інститут чорної металургії ім.З.І.Некрасова НАН України*

**Анотація.** Метою дослідження є моделювання в лабораторних умовах характеру поведінки залізородних матеріалів в зоні розм'якшення-плавлення ДП і краплинної течії з використанням комплексної методики, розробленої в Інституті чорної металургії. Показано, що поширене уявлення щодо формування у доменній печі первинного шлакового розплаву на основі FeO має місце переважно в початковий період шлакоутворення та справедливе для залізородних матеріалів низької основності. Для окатишів характер формування рідких фаз істотно відрізняється від агломерату. Експериментально встановлено зміну складу шлакового розплаву за мірою нагрівання. Показано, що в умовах температурно-теплової обробки сировини кожній температурі відповідає свій склад рідкої фази. При проплавленні окатишів первинний розплав формується в температурному діапазоні 1330–1360<sup>0</sup>C, в якому частка первинного шлаку становить 16–25%. Розплав висококремнистої кускової руди формується при високих температурах 1490–1520<sup>0</sup>C. Маса первинного шлаку з 42–48% FeO становить 4–8% від маси залізородних матеріалів. Основна частина розплаву залежить від коксової насадки на шарі коксу при температурах вище 1600<sup>0</sup>C. Розплави, що утворюються з сумішей залізовмісних матеріалів, як правило, мають усереднені характеристики. Виявлені закономірності дають можливість прогнозувати поведінку і властивості багатокомпонентних шихтових сумішей в доменній печі.

**Ключові слова:** доменна піч, залізородні матеріали, моделювання, температурно-теплова обробка, відновлення, розплави

*«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2018. - Вып.32  
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2018. – Collection 32  
«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2018. – Vypusk 32*

**Посилання для цитування:** Нестеров А.С. Исследование высокотемпературных свойств железорудных материалов в лабораторных условиях / А.С. Нестеров, Л.И. Гармаш, К.П. Лопатенко, М.Г. Болденко, Н.В. Горбатенко, Э.И. Лытарь // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2018. - Вып.32. – С.64-79.

**Doi:**

**Состояние проблемы.** Основные закономерности процессов, протекающих в высокотемпературной зоне доменной печи, были сформулированы классиками теории доменной плавки еще в середине XX в. [1-2]. Несмотря на то, что главные их положения не утратили актуальности до сих пор, накопленная информация, расширение наших знаний, а также существенные изменения топливно-сырьевых условий доменной плавки требуют более глубокого переосмысления для дальнейшего развития представлений о ходе доменного процесса [3].

Закономерности поведения железорудных материалов в доменной печи, изменение их агрегатного состояния в процессе нагрева при разной температуре являются необходимой научной базой для выбора рациональных путей повышения технико-экономических показателей доменной плавки. Состояние материалов и их поведение в низкотемпературной зоне доменной печи изучено достаточно подробно [4], а процессы размягчения и плавления в высокотемпературной зоне, которые определяются, в основном, температурными условиями и степенью восстановления, изучены в меньшей степени [5]. Но именно процессы в области заплечиков и горна, зоне, где формируются продукты плавки, их качественные и количественные характеристики, определяющие технико-экономические показатели технологии производства чугуна, оказывают наибольшее влияние на уровень устойчивости режимов работы доменной печи.

Для обеспечения ровного и форсированного хода доменной печи важно определить закономерности поведения железорудных материалов в зоне размягчения и плавления при температурах выше 1200°C (зоне когезии), знать температуры размягчения материала и полной потери газопроницаемости железорудного слоя, температуры формирования и фильтрации первичных шлаковых и металлоуглеродистых расплавов через коксовую насадку. Чем выше полнота истечения расплава, тем более стабильным, производительным и экономичным будет режим работы доменной печи.

Свойства расплавов в значительной степени определяется качеством железорудной шихты и качеством кокса. Расплав, образованный железорудной шихтой, должен хорошо фильтроваться через коксовую насадку, а кокс, в свою очередь, должен обеспечивать формирование коксовой насадки с максимальной дренажной способностью. Характер формирования жидких фаз в нижней части доменной печи во многом определяет интенсивность плавки и степень использования тепловой и химической энергии газового потока.

Изучение поведения расплавов в условиях действующей доменной печи характеризуются достаточной сложностью экспериментов и плохой воспроизводимостью результатов [6-7]. Поэтому в ИЧМ для исследования таких процессов в лабораторных условиях разработана комплексная методика, включающая моделирование поведения железорудных материалов в сухой зоне

*«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2018. - Вып.32*

*«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy».* – 2018. – Collection 32

*«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii».* – 2018. – Vypusk 32

доменной печи, в зоне размягчения-плавления и капельного течения и расчетно-аналитический эксперимент [8]. Исследования проводятся на установке, позволяющей регистрировать усадку шихтового материала по мере нагрева, наблюдать характер истечения жидкости, фиксировать ее и затем исследовать состав и свойства.

**Целью исследования** является моделирование в лабораторных условиях характера поведения железорудных материалов в зоне размягчения-плавления ДП и капельного течения с использованием комплексной методики, разработанной в Институте черной металлургии.

**Методика исследования.** В ходе эксперимента автоматически фиксируется температура в реакционном пространстве и величина усадки слоя. Температура начала каплеотделения определяется визуально через смотровое окно герметичного приемника. По количеству жидкой фазы, натекшей в ячейки приемного диска, судят о скорости ее дренажа через коксовую насадку. Материал из каждой ячейки и оставшийся расплав в слое кокса при температуре  $1600^{\circ}$  взвешивается и магнитной сепарацией разделяется на шлаковую и металлические составляющие, для каждой из которых проводится химический анализ.

**Изложение основных результатов исследования.** Результаты испытания представляются в виде диаграмм, на которых показывается изменение усадки слоя и масса вытекших из реакционного пространства жидких фаз в зависимости от температуры (рис. 1).

$t_0$  – температура начала усадки слоя. Газопроницаемость железорудного слоя начинает ухудшаться вследствие образования достаточно прочного спека. Промежутки между гранулами наполняются жидкими фазами шлака и металла, изменение формы образца не наблюдается. При достижении усадки около 30% просветность массы значительно уменьшается за счет изменения и уплотнения формы железорудных материалов, при этом часть из них разрушается.

$t_1$  (или  $T_{45}$ ) – температура полной потери газопроницаемости слоя. При усадке около 48% порозность слоя близка к нулю и он становится практически газонепроницаемым. Спек плотно впрессовывается в коксовую насадку. По нашим наблюдениям такое состояние материала характерно для усадки слоя 42-50%, которая определяется параметрической температурой потери газопроницаемости слоя материалов, ограничивающей «сухую» зону в доменной печи. Эти экспериментальные данные подтверждают данные литературных источников о том, что в доменной печи газ движется в горизонтальном направлении по коксовым окнам в зоне когезии при уплотнении рудного слоя начиная с примерно 40%.

$t_2$  (или  $T_{нф}$ ) – температура начала каплеотделения расплава, образования и фильтрации жидких фаз через коксовую насадку. По мере дальнейшего нагрева железорудной массы в интервале  $t_2$ - $t_3$  от нее отделяется первичный расплав, характеризующийся высоким содержанием монооксида железа.

$t_3$ - $t_5$  – температурный интервал совместного истечения металла и шлака (с максимумом при  $t_4$ ).

$t_4$  (или  $T_{мф}$ ) – температура капельного течения расплава. При дальнейшем нагреве образуется основное количество расплава из металла и шлака, которые совместно отделяются от коксовой насадки.

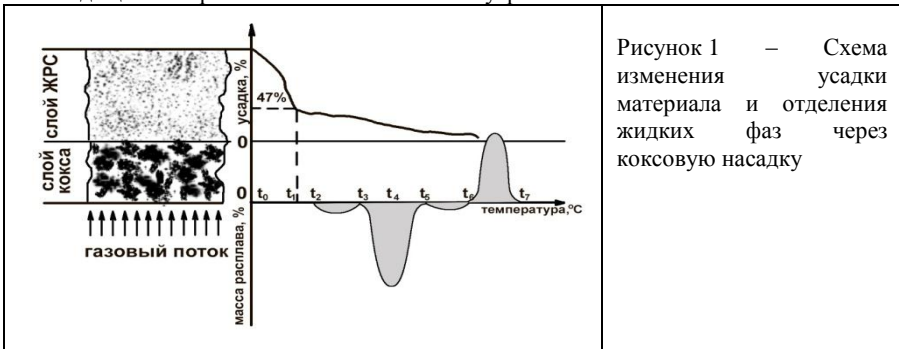
$t_6$ - $t_7$  – в этом диапазоне вытекает небольшое количество более тугоплавкого промежуточного шлака. При температурах выше  $1600^{\circ}$  ( $t_6$ - $t_7$ ) практически у всех

*«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2018. - Вып.32*

*«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2018. – Collection 32*

*«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2018. – Vypusk 32*

железородных материалов наблюдается остаток тугоплавкого материала, находящегося в размягченном состоянии внутри коксового слоя.



Кроме температуры определяются наиболее значимые параметры высокотемпературных превращений:

- $M_{\text{пш}}$  – масса первичного высокоокисного расплава, образующегося в интервале температур ( $t_2$ - $t_3$ ) с высоким содержанием FeO, восстанавливаемым в печи только прямым путем за счет перерасхода кокса;
- $FeO_{\text{пш}}$  – содержание FeO в первичном расплаве, характеризующее его агрессивность к гарнисажу и футеровке;
- $M_{\text{ост}}$  – доля тугоплавкой (при температуре выше  $1600^\circ\text{C}$ ) вязкой составляющей смеси оксидов и металла с высоким содержанием углерода, не дренирующая через коксовую насадку.

Значение результатов таких исследований, позволяющих анализировать поведение железородных материалов в высокотемпературной зоне доменной печи, особенно возрастает при проплавке нескольких типов железородных материалов, различающихся основностью, содержанием магнезии и другими характеристиками [9-10].

#### Смеси агломератов и окатышей.

В таблице 1 приведены исходный химический состав лабораторных агломератов, спеченных из шихты, в состав которой входили аглоруда, 2 вида концентрата, окалина, аспирационная и колошниковая пыль и конвертерный шлак; окатышей и их смесей, а на рис. 2 – динамика фильтрации жидких продуктов плавки через коксовую насадку.

Как видно, процесс фильтрации жидких фаз через коксовую насадку для различных видов железородного сырья имеет значительные различия. Для рядовых окатышей характерны минимальные температуры образования и фильтрации жидких фаз через коксовую насадку и широкий интервал вязко-пластичного состояния. Через стадию первичного шлакообразования с содержанием оксида железа более 36%

проходит порядка 30% от общей массы расплава, затем происходит совместное истечение металла и шлака. На коксовой насадке, как правило, остается 6-8% шлаковой составляющей.

Таблица 1 – Химический состав и свойства лабораторных агломератов, окатышей и их смесей

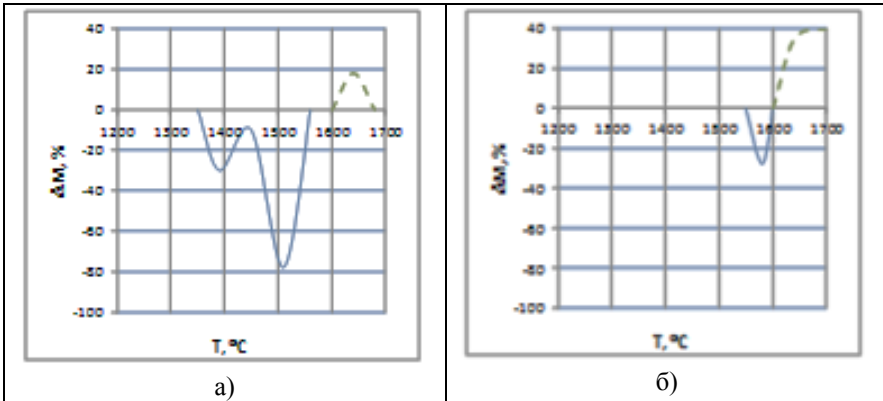
Показатели		Агломераты							Ока- тыши ряд.	Смеси ЖРС	
		База	Опытные							35% Ч.7 + 65% Ок. ряд.	25% Ч.7 + 75% Ок. Экст- ра
			Ч.1	Ч.2	Ч.3	Ч.4	Ч.5	Ч.6			
Химический состав, %	Fe	59,4	58,96	58,5	59,93	59,49	59,18	56,4	63,65	58,9	63,8
	FeO	12,8	13,68	12,6	11,9	13,2	12,8	9,42	1,85	4,7	3
	SiO <sub>2</sub>	5,6	5,75	5,86	5,94	6,09	6,15	2,94	5,04	5,4	3,2
	CaO	8,2	8,38	8,66	7,27	7,49	7,45	9,24	3,65	6,2	3,8
	MgO	2,6	2,73	2,83	2,28	2,37	2,5	5,59	0,22	2,09	1,53
	MnO	0,24	0,28	0,31	0,23	0,27	0,29	-	-	-	-
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,8	1,81	1,81	1,79	1,8	1,8	2,06	0,33	0,85	0,68
	CaO/SiO <sub>2</sub>	1,46	1,46	1,48	1,22	1,23	1,21	3,14	0,72	1,13	1,16
Высокотемпературные свойства	T <sub>пг</sub>	1300	1310	1315	1290	1295	1300	1360	1280	1290	1300
	T <sub>нф</sub>	1510	1500	1495	1460	1410	1415	-	1360	1385	1410
	T <sub>мф</sub>	1525	1530	1535	1490	1490	1500	1560	1460	1490	1480
	M <sub>пш</sub>	10,2	9,4	8,9	14,3	13,5	13,8	-	28,6	15,9	18,4
	FeO <sub>пш</sub>	9	7,6	7	13,4	9,5	8	-	36,17	15,4	18
	MgO <sub>пш</sub>	7,8	8,3	8,7	7,4	7,6	8	-	0,68	8,8	7,3
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sub>пш</sub>	6,4	6,3	6,3	6,3	6,2	6,1	-	0,92	5,6	6,15
	CaO <sub>пш</sub> SiO <sub>2</sub>	1,4	1,36	1,34	1,16	1,18	1,14	-	0,64	1,13	1,16
	[C]	3,4	-	-	3,2	-	-	3,9	2,6	3,4	-
	[Si]	0,25	-	-	0,22	-	-	0,38	0,18	0,26	-

При проплавке агломерата основностью 1-1,2 ед. с различным уровнем магнезии или смеси агломерата и окатышей близкой основности

вначале через стадию первичного шлакообразования проходит 12-15% материала, затем происходит совместное отделение первичного шлака и металлоуглеродистого расплава. Остаток расплава в слое кокса повышается до 10-14%.

При повышении основности агломерата до 1,5-1,65 ед. формирование и фильтрация шлакового и металлоуглеродистого расплава через коксовую насадку проходят совместно. Остаток расплава в слое кокса может повышаться до 18-20%. Расплав высокоосновного агломерата Ч.7, профильтровавшийся через коксовую насадку, практически полностью состоит из металлоуглеродистого расплава, шлаковая составляющая, несмотря на перегрев материала до 1600°C, практически вся остается в слое кокса. В температурном диапазоне 1540-1600°C вытекает около 25% от массы загружаемого материала, практически полностью состоящего из металлоуглеродистого расплава. Немагнитной составляющей в вытекшем расплаве менее 2%.

При проплавке смеси рядовых окатышей с высокоосновным агломератом в соотношении 65 : 35 температурный интервал образования и фильтрации расплава через коксовую насадку шире, чем аналогичный интервал при проплавке агломерата соответствующей основности. Смесь ведет себя как новый вид материала.



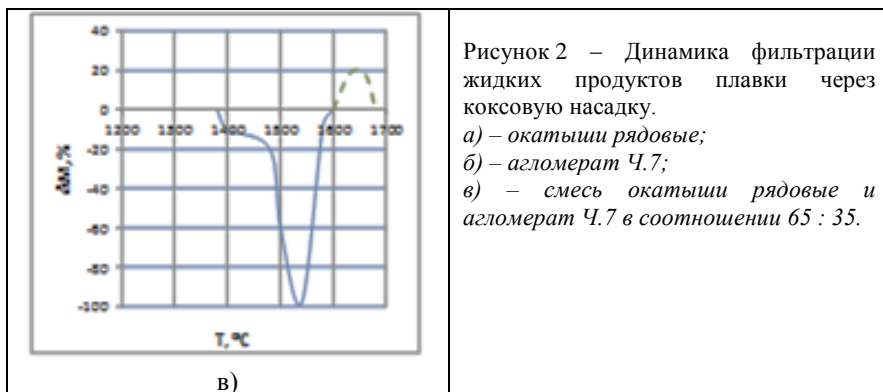


Рисунок 2 – Динамика фильтрации жидких продуктов плавки через коксовую насадку.

а) – *окатыши рядовые;*

б) – *агломерат Ч.7;*

в) – *смесь окатыши рядовые и агломерат Ч.7 в соотношении 65 : 35.*

Практически во всех вариантах в начале отделяется жидкая фаза относительно низкой основности с повышенным содержанием FeO. По мере повышения температуры содержание FeO в отдельных порциях шлакового расплава понижается, а суммарная основность увеличивается.

Таким образом, исследование поведения различных видов лабораторного агломерата в зоне высоких температур, определение химического состава и свойств первичных шлаковых и металлоуглеродистых расплавов показали:

- распространенное представление о формировании в доменной печи первичного шлакового расплава на основе FeO имеет место преимущественно в начальный период шлакообразования и справедливо для железорудных материалов низкой основности;

- смесь высокоосновного агломерата и окатышей ведет себя как новый вид материала, причем интервал вязко-пластичного состояния шире, чем температурный диапазон для одного вида сырья аналогичного химического состава.

#### **Степень восстановления и скорость нагрева.**

Значительное влияние на характер формирования жидких фаз оказывают степень восстановления железорудного сырья и скорость нагрева. Степень восстановления может зависеть от продолжительности пребывания материалов в сухой зоне доменной печи (интенсивности плавки или изменения уровня загрузки), от распределения рудной нагрузки по сечению доменной печи и условий охлаждения футеровки шахты.

Для изучения влияния восстановимости железорудных материалов на процессы формирования первичных шлаковых расплавов было исследовано поведение образцов агломерата основностью 1,35 ед. и окатышей со степенью офлюсования 0,8 ед., предварительно обработанных восстановительным газом (30% CO + 70% N<sub>2</sub>) в



динамическом режиме с остановками при температурах 850<sup>0</sup>С и 1000<sup>0</sup>С. Результаты опытов, представленные в табл. 2 и на рис.3-4, показывают, что в процессе нагрева материала первоначально образуется и отделяется жидкая фаза относительно низкой основности с повышенным содержанием Fe<sub>x</sub>O. По мере роста температуры количество Fe<sub>x</sub>O снижается при соответствующем увеличении количества других компонентов (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO), причем количество основных оксидов (CaO, MgO) преобладает над количеством кремнекислоты, что приводит к возрастанию основности первичных расплавов с повышением температуры.

Таблица 2. Характеристики формирования жидких фаз из агломерата и окатышей с различной степенью восстановления

Материал	R, %	W, %	Интервал температур, <sup>0</sup> С	ΔM	FeO	MgO	осн.
Агломерат	46	26	1410 - 1450	6	16,2	6,8	1,18
	46	26	1450 - 1500	8	9,6	7,2	1,32
	46	26	1500 - 1550	6	5,4	7,4	1,38
	46	26	1550 - 1600	9	2,8	7,8	1,46
	69	60	1470 - 1500	3	13,8	7,2	1,29
	69	60	1500 - 1530	4	9,2	7,4	1,32
	69	60	1530 - 1560	7	4,2	7,4	1,36
	69	60	1560 - 1600	8	2,2	7,8	1,38
Окатыши	48	21	1290 - 1350	9	48	0,8	0,56
	48	21	1350 - 1400	9	36	0,86	0,58
	48	21	1400 - 1450	16	24,6	0,9	0,64
	48	21	1450 - 1500	11	11	0,9	0,68
	48	21	1500 - 1550	10	3	0,92	0,64
	64	42	1360 - 1400	8	36	0,76	0,52
	64	42	1400 - 1450	7	28	0,80	0,64
	64	42	1450 - 1500	10	12	0,8	0,72
	64	42	1500 - 1550	11	4	0,84	0,76

Для агломерата общий характер описанных закономерностей в основном сохраняется независимо от степени восстановления, однако с возрастанием этого параметра уменьшается масса первичных шлаков, и, соответственно, суммарное количество закиси железа в первоначально выделенном расплаве. При этом на коксовой насадке восстанавливается меньшее количество Fe<sub>x</sub>O, что приводит к снижению степени прямого восстановления в доменной печи, повышает степень использования газа и, в конечном итоге, приводит к уменьшению расхода кокса. Например, с увеличением степени восстановления агломерата с 46 до 69% температура начала каплеотделения возрастает на 40<sup>0</sup>С. При этом максимальное количество расплава отделяется в области температур 1520-1580<sup>0</sup>С.

Для окатышей характер формирования жидких фаз существенно отличается от агломерата. При невысоких значениях степени восстановления в окатышах образуется большое количество первичных расплавов (в 2,5 раза больше по сравнению с окатышами, восстановленными до 60%) с высоким (до 48%) содержанием оксида железа.

Также на характер формирования жидких фаз большое влияние оказывает скорость нагрева – ускоренный нагрев смещает процесс фильтрации основной массы расплава в область более высоких температур, не меняя, однако, характера их вытекания, лишь несколько изменяется соотношение образующейся металлической и шлаковой составляющих (в пользу последней) за счет уменьшения времени контакта жидкой фазы с восстановительной средой (рис. 4).

Как видно, различные виды железорудного сырья в высокотемпературной зоне доменной печи ведут себя по-разному. Экспериментально установленные изменения состава шлакового расплава по мере нагрева показывают, что каждой температуре соответствует свой состав жидкой фазы, что, естественно, играет важную роль в определении оптимального состава и условий температурно-тепловой обработки сырья в доменной печи.

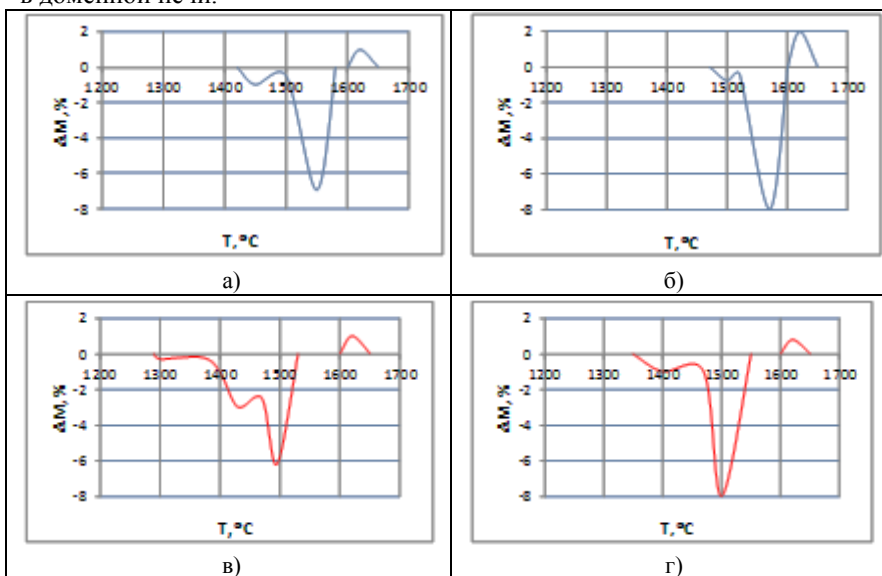


Рисунок 3 – Характер отделения жидкой фазы из железорудных материалов при различных уровнях степени восстановления (R) и степени металлизации (W). а) агломерат,  $R = 46$ ,  $W = 26$ ; б) агломерат,  $R = 69$ ,  $W = 60$ ; в) окатыши,  $R = 48$ ,  $W = 21$ ; г) окатыши,  $R = 66$ ,  $W = 60$ .

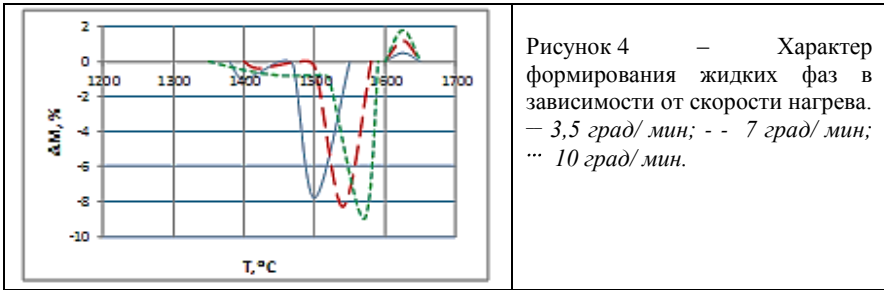


Рисунок 4 – Характер формирования жидких фаз в зависимости от скорости нагрева.  
— 3,5 град/ мин; - - 7 град/ мин;  
... 10 град/ мин.

Картина значительно усложняется в случае многокомпонентного сырья, когда используется значительное количество различных добавок, в том числе, вторичных ресурсов. С помощью описанной методики в лабораторных условиях были изучены свойства таких расплавов с целью прогнозирования их поведения в высокотемпературной зоне доменной печи. В таблицах 3-4 и на рис. 5 представлены результаты исследований высокотемпературных свойств лабораторных агломератов из аглошихты с различной долей шлаков сталеплавильного производства и их смесей с окатышами, кусковой рудой, конвертерным шлаком и сталеплавильным скрапом.

Таблица 3. Химический состав железорудных материалов

	Наименование пробы	Кол-во шлака в аглошихте	Содержание компонентов, %						
			FeO <sub>общ</sub>	Fe <sub>мет</sub>	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
1	Агломерат 1	0	59,37	-	11,8	8,02	5,15	1,14	2,6
2	Агломерат 2	30	58,3	-	11,12	8,74	5,25	1,21	2,98
3	Агломерат 3	50	58,1	-	10,83	8,78	5,66	1,14	2,65
4	Агломерат 4	70	57,7	-	10,64	9,25	5,96	1,18	2,85
5	Окатыши	-	63,0	-	1,5	3,7	5,1	0,33	0,27
6	Руда	-	44,4	-	6,2	3,07	27,2	0,42	0,36
7	Шлак конвертерный (ШК)	-	20,1	22,3	23	32,9	12,1	1,8	9,1
8	Скрап сталеплав.(СС)	-	63,8	48,7	19,4	20,9	8,6	1,6	4,7
9	Смесь Агл3 90% +ШК5%+СС 5%	-	56,48	3,55	11,87	10,59	6,12	1,12	3,07
10	Смесь Агл 4 66% +ОК 30% +ШК 2%+СС 2%	-	58,66	1,42	8,32	8,29	5,88	0,95	2,24

11	Смесь Агл 3 66% +ОК 25% + руда 5% + ПШК 2% + СС 2%	-	57,03	3,55	9,30	9,04	7,07	0,96	2,37
12	Смесь Агл 3 60% +ОК 20%+руда 10% + СС10%	-	55,85	7,1	11,04	11,38	6,49	1,12	3,02

Таблица 4. Высокотемпературные свойства железорудных материалов

	Температура, °С		Масса первичного шлака	Содержание компонентов, %					
	потери газопр. слоя	начала фильтр.		в первичном шлаке					в мет.
				CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	
1	1330	1465	10,4	42,05	31,93	9,32	3,05	13,65	3,4
2	1340	1482	9,5	43,94	32,24	10,79	3,35	9,68	3,2
3	1330	1467	10,6	42,64	32,35	9,56	3,06	12,4	3,6
4	1335	1475	10,7	43,27	32,62	10,3	3,2	10,6	3,3
5	1270	1360	19,9	34,15	31,55	3,56	0,67	30,06	2,6
6	1310	1470	4	22,44	47,23	7,1	0,66	22,57	2,8
7	1290	1460	6	38,79	9,88	19,72	3,9	27,71	2,6
8	1320	1470	8,5	32,6	16,06	9,32	3,23	38,79	2,2
9	1340	1478	9,5	41,9	30,04	10,19	3,13	14,73	3,3
10	1310	1460	15,8	37,34	29,52	7,59	2,17	23,37	3
11	1316	1450	18,2	36,66	30,07	7,91	2,17	23,18	2,9
12	1342	1475	14	42,86	30,48	10,15	2,86	25,65	3,1

При восстановительно-тепловой обработке агломерата основностью 1,55 ед. образуется небольшое количество первичного шлакового расплава (8-10%) в зоне температур 1450-1480<sup>0</sup> при содержании FeO 9,68-13,65%, затем из массы расплава отделяется металлическая составляющая совместно с шлаковой. Зона максимальной фильтрации расплава 1500-1520<sup>0</sup>. Остаток расплава в слое кокса составляет 25-40% (рис. 5а).

При проплавке окатышей первичный расплав формируется в температурном диапазоне 1330-1360<sup>0</sup>, в котором доля первичного шлака составляет 16-25%. Содержание закиси железа в первичном шлаковом расплаве находится в пределах 35-38%. Основность первичного расплава и содержание в нем MgO ниже исходного уровня на 0,1 ед. и 0,5% соответственно. В зоне максимальной фильтрации происходит совместное истечение металла и шлака. Содержание FeO в промежуточном шлаковом расплаве 18-20%, содержание углерода в металлоуглеродистом расплаве 2,8-3,2% (рис. 5б).

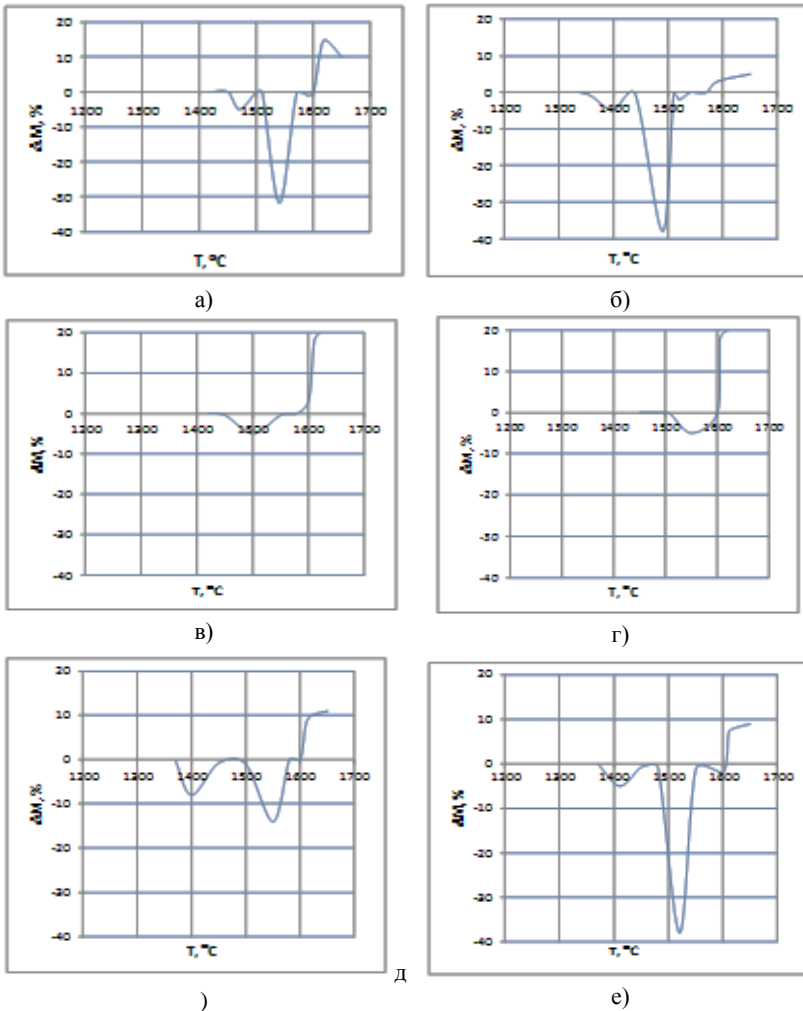


Рисунок 5 – Характер истечения расплава из железосодержащих материалов через коксовую насадку. а – агломерат; б – окатыши; в – руда; г – конвертерный шлак; д – сталеплавильный скрап; е – смесь: 90% агломерата + 10% окатышей.

Расплав из высококремнистой кусковой руды формируется при высоких температурах 1490-1520<sup>0</sup>. Масса первичного шлака с 42-48% FeO составляет 4-8% от массы железорудных материалов. Основная часть расплава зависает на коксовой насадке на слое кокса при температурах выше 1600<sup>0</sup> (рис. 5в).

Расплав из конвертерных шлаков начинает протекать через коксовую насадку при температурах 1540-1560<sup>0</sup>. Его масса незначительна и составляет 4-6% от количества исходного материала. Основная масса расплава при температуре 1600<sup>0</sup> остается зависшей на коксовой насадке (рис.5г).

Сталеплавильный скрап при проплавке на коксовой насадке начинает дренировать через нее при температурах 1320-1350<sup>0</sup>. Масса первичного шлакового расплава, отделившегося от основной массы спека, составляет 12-18%. Затем при температурах 1560-1580<sup>0</sup> протекает основная часть металлоуглеродистого расплава с содержанием углерода в нем 2,8-3%. Масса остатка расплава в слое кокса при температуре 1600<sup>0</sup> составляет 14-16% (рис.5д). Из смеси железорудных материалов и сталеплавильных шлаков формируется жидкоподвижный расплав в температурном диапазоне 1440-1480<sup>0</sup>. Масса первичного расплава из смесей различных компонентов – в пределах 14-20%, содержание FeO в нем, в зависимости от состава смеси, изменяется в пределах от 8 до 26%.

Расплавы, образующиеся из смесей железосодержащих материалов, как правило, имеют усредненные характеристики. Так, например, расплав из смеси агломерата и окатышей в сравнении с расплавом из агломерата имеет более низкие температуры начала плавления жидких фаз и повышенное содержание в нем FeO. Ввод в эту смесь кусковой руды или шлаков сталеплавильного производства увеличивает количество первичных высокозакисных расплавов в 1,5-2 раза по сравнению с количеством первичного шлака из агломерата или смеси агломерата и окатышей [11].

**Заключение.** Показано, что распространенное представление о формировании в доменной печи первичного шлакового расплава на основе FeO имеет место преимущественно в начальный период шлакообразования и справедливо для железорудных материалов низкой основности. Для окатышей характер формирования жидких фаз существенно отличается от агломерата. При невысоких значениях степени восстановления в окатышах образуется большое количество первичных расплавов (в 2,5 раза больше по сравнению с окатышами, восстановленными до 60%) с высоким (до 48%) содержанием оксида железа. Экспериментально установлено изменение состава шлакового расплава по мере нагрева. Показано, что в условиях температурно-тепловой обработки сырья каждой температуре соответствует свой состав жидкой фазы. При проплавке окатышей первичный расплав формируется в температурном диапазоне 1330-1360<sup>0</sup>, в котором доля первичного шлака составляет 16-25%. Расплав из высококремнистой кусковой руды формируется при высоких температурах 1490-1520<sup>0</sup>. Масса первичного шлака с 42-48% FeO составляет 4-8% от массы железорудных материалов. Основная часть расплава зависит на коксовой насадке на слое кокса при

температурах выше 1600<sup>0</sup>. Расплавы, образующиеся из смесей железосодержащих материалов, как правило, имеют усредненные характеристики.

Обнаруженные закономерности дают возможность прогнозировать поведение и свойства многокомпонентных шихтовых смесей, позволяют сформулировать требования к их распределению по сечению колошника доменной печи и прогнозировать их влияние на футеровку доменной печи

### Библиографический список

1. Павлов М.А. *Металлургия чугуна*. М.: Metallurgizdat, - 1944.
2. Остроухов М.Я. *Процессы шлакообразования в доменной печи*. М.: Metallurgizdat, - 1963. – 223с
3. Большаков В.И., Товаровский И.Г. *Познание процессов доменной плавки*. Днепропетровск: Пороги, 2006. - 440 с.
4. Busly N.J. *Фундаментальные исследования фазового состава и структуры агломерата с целью оптимизации его металлургических свойств/ N. J. Busly, T. Fray // Rymet. – 21-23 Sept. 1987. – L. 1987. – P. 141-166.*
5. Мосейко Ю.В. Вивчення інтервалу розм'якшення відновлених залізорудних матеріалів різних фракцій в умовах доменного плавлення. / Мосейко Ю.В., Куріс Ю.В., О.С. Воденнікова, С.В. Бараннік та інші// *Металургія*. Вип. 2(34). – 2016. – С.9-14.
6. *Восстановление, теплообмен и гидродинамика в доменном процессе// Академия наук СССР, Уральский филиал. Под. редакцией С.В. Шаврина. Свердловск: - 1970 г. –С. 76.*
7. Цылев Л.М. *Восстановление и шлакообразование в доменном процессе. – М.: Наука. – 1970, - 158 с.*
8. Гладков Н.А., Нестеров А.С. *Процессы в слое железорудных материалов при его нагревании/ Металлы. – 1987. – № 3. С. 9-11.*
9. *Оценка металлургических свойств кусковой руды ПАО «Евраз-Суша Балка»/ Нестеров А.С., Гармаш Л.И., Болденко М.Г. и др. // Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – Днепропетровск. – 2014. – Вып.28. – С.103-110.*
10. *Получение агломерата заданного состава и свойств при вовлечении в шихту вторичного сырья/Нестеров А.С., Джигота А.Д., Якушев В.С., Гармаш Л.И. и др.// Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – Днепропетровск. – Вып. 24. – 2011. – С. 29-37.*
11. *Влияние первичных шлаковых и металлоуглеродистых расплавов на стойкость футеровки нижней части шахты доменных печей. /Нестеров А.С., Большаков В.И., Можаренко Н.М., Гармаш Л.И.// Научно техническая конференция «Технология и применение огнеупоров и технической керамики в промышленности». - 2008г. – Харьков. – С.45.*

### Reference

1. Pavlov M.A. *Metallurgiya chuguna*. M.: Metallurgizdat, - 1944.
2. Ostroukhov M.YA. *Protsestry shlakoobrazovaniya v domennoy pechi*. M.: Metallurgizdat, - 1963. – 223s

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2018. - Вып.32  
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2018. – Collection 32  
 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2018. – Vypusk 32

3. Bol'shakov V.I., Tovarovskiy I.G. Poznaniye protsessov domennoy plavki. Dnepropetrovsk: Porogi, 2006. - 440 s.

4. Busly N.J. Fundamental'nyye issledovaniya fazovogo sostava i struktury aglomerata s tsel'yu optimizatsii yego metallurgicheskikh svoystv/ N. J. Busly, T. Fray // Pyromet. – 21-23 Sept. 1987. – L. 1987. – R. 141-166.

5. Moseyko YU.V. Vychennyya intervalu rozm'yakshennyya vidnovlenykh zalizorudnykh materialiv raznykh fraktsiy v umovakh domennogo plavlennyya. / Moseyko YU.V., Kuris YU.V., O.S. Vodennikova, S.V. Barannik ta insh// Metalurhiya. Vyp. 2(34). – 2016. – S.9-14.

6. Vosstanovleniye, teploobmen i gidrodinamika v domennom protsesse// Akademiya nauk SSSR, Ural'skiy filial. Pod. redaktsiyey S.V. Shavrina. Sverdlovsk: - 1970 g. –S. 76.

7. Tsylev L.M. Vosstanovleniye i shlakobrazovaniye v domennom protsesse. – M.: Nauka. – 1970, - 158 s.

8. Gladkov N.A., Nesterov A.S. Protsessy v sloye zhelezorudnykh materialov pri yego nagrevanii/ Metally. – 1987. – № 3. S. 9-11.

9. Otsenka metallurgicheskikh svoystv kuskovoy rudy PAO «Yevraz-Sukha Balka»/ Nesterov A.S., Garmash L.I., Boldenko M.G. i dr. // Sb. nauchn. tr. ICHM «Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii». – Dnepropetrovsk. – 2014. – Vyp.28. – S.103-110.

10. Polucheniye aglomerata zadannogo sostava i svoystv pri vovlechenii v shikhtu vtorichnogo syr'ya/Nesterov A.S., Dzhigota A.D., Yakushev V.S., Garmash L.I. i dr.// Sb. nauchn. tr. ICHM «Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii». – Dnepropetrovsk. – Vyp. 24. – 2011. – S. 29-37.

11. Vliyaniye pervichnykh shlakovykh i metallouglerodistykh rasplavov na stoykost' futerovki nizhney chasti shakhty domennykh pechey. /Nesterov A.S., Bol'shakov V.I., Mozhareno N.M., Garmash L.I.// Nauchno tekhnicheskaya konferentsiya «Tekhnologiya i primeneniye ogneuporov i tekhnicheskoy keramiki v promyshlennosti». - 2008g. – Khar'kov. – S.45.

*Статья поступила в редакцию сборника 13.09.2018 года, прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания редакционной коллегии сборника №1 от 26 декабря 2018 года)  
Рецензенты: д.т.н., проф.А.К. Тараканов; к.т.н. Н.М. Можаренко*