

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОИЗВОДСТВА ОКАТЫШЕЙ
И НОВОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ
ДЛЯ СОВРЕМЕННОЙ
ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ**

ТОМ I

**ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИЯ
И ОБОРУДОВАНИЕ
ПОДГОТОВКИ ШИХТ
И ИХ ОКОМКОВАНИЯ
В ПРОИЗВОДСТВЕ ОКАТЫШЕЙ**



УДК 669.162.26

ББК 34.323

С56

А в т о р ы :

*Ф. М. Журавлев, В. П. Лялюк, Н. И. Ступник, В. С. Моркун,
Е. В. Чупринов, Д. А. Кассим*

Р е ц е н з е н т ы :

академик Академии инженерных наук Украины, заслуженный деятель науки
и техники Украины, доктор технических наук, профессор *В. А. Петренко*;
академик Академии горных наук Украины, лауреат премии НАН Украины,
доктор технических наук, профессор *И. Г. Товаровский*;
профессор Национальной металлургической академии Украины,
доктор технических наук *В. В. Бочка*

**С56 Совершенствование технологии производства окатышей и ново-
го железорудного сырья для современной доменной плавки. В 2 т.
Т. 1 : Теория, технология и оборудование подготовки шихт и их окомко-
вания в производстве окатышей / [Журавлев Ф. М. и др.] – Москва ; Во-
логда : Инфра-Инженерия, 2020. – 332 с.
ISBN 978-5-9729-0455-6 (Том 1)
ISBN 978-5-9729-0457-0**

Высокие металлургические характеристики готового окускованного материала формируются в двух основных технологических этапах: подготовка сырых окатышей с необходимыми составами и свойствами и термоупрочнение сырых окатышей, обеспечивающее получение готового обожженного материала с нужными металлургическими характеристиками. В первом томе рассматриваются теория, технологии и оборудование для подготовки компонентов шихты с требуемыми физико-химическими характеристиками, их дозирование, смешивание, окомкование с получением сырых окатышей необходимого качества. Во втором томе рассматриваются теория, технологии и оборудование для термоупрочнения сырых окатышей или формирования новых видов окускованных материалов с нужными металлургическими характеристиками.

Для студентов высших учебных заведений горно-металлургического и экономическо-го профилей, а также специалистов черной металлургии и смежных с ней отраслей.

УДК 669.162.26

ББК 34.323

ISBN 978-5-9729-0455-6 (Том 1)

ISBN 978-5-9729-0457-0

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2020

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2020

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛА

Чугун и сталь были, есть и будут в обозримом будущем основными материалами для создания оборудования, машин, механизмов, различной техники и т.п., а все это, в основном, изготавливается из стали. Сталь же выплавляют из чугуна, а чугун – из железосодержащего сырья (руды, агломерата и окатышей).

В 2015-2016 годах количество произведенного железорудного сырья и выплавленного из него металла в мире и некоторых странах приведено в табл. 1.

Получение металла есть совокупность ряда самостоятельных, сложных технологических процессов, находящихся во взаимовлиянии [1-3]. К ним относятся следующие процессы: добыча руд (богатых и бедных), их усреднение по химическому составу и крупности, подготовка по крупности для дальнейшего обогащения, получение железорудных концентратов с повышенным содержанием железа, окускование руд и концентратов, выплавка чугуна (коксовая и бескоксовая), выплавка стали и получение металлопроката для изготовления оборудования (рис. 1).

Традиционный комплекс металлургических процессов в черной металлургии включает в себя: подготовку компонентов шихты для выплавки чугуна, выплавку жидкого чугуна в доменной печи, выплавку стали в сталеплавильных агрегатах (кислородные конвертеры, мартеновские печи, электропечи), производство проката.

Шихта доменной плавки состоит из трех основных компонентов: железосодержащей части (агломерат, окатыши, кусковая руда); флюса кускового (известняк, доломитизированный известняк) и твердого топлива (кокс, антрацит). Эти материалы загружаются в доменную печь одновременно в определенных соотношениях и последовательности.

Основной принцип доменной плавки – это восстановление оксидов железа из железосодержащих кусковых материалов в противоточном их движении (сверху вниз) и горячих восстановительных газов (снизу вверх).

Основная задача доменной плавки – обеспечение равномерного (по сечению печи) опускания материалов (твердых, размягченных и жидких) и их обработка восстановительными газами в условиях значительного подпора восходящих со скоростью 5-15 м/с газов при непрерывном возрастании температуры в печи сверху вниз от 250-350 °С до 1500-1650 °С. Скорость опускания материала в разных участках сечения доменной печи колеблется в пределах 20-140 мм/мин.

Процесс получения металла из его оксидов – это восстановительный процесс. Основными восстановителями в доменной печи являются оксид углерода, водород и углерод кокса. Исходя из величины сродства к кислороду восстановителей и восстанавливаемых оксидов, их восстановление начинается при разных температурах. Оксиды металлов, попадающие в доменную печь разделяют на:

а) практически полностью восстанавливающиеся (Fe, Ni, Co, Pb, Cu, P, Zn и др.);

Таблица 1. Запасы и добыча руд и металла, млн. т. год

Страна	Мировые подтвержденные запасы руд		Добыто богатых и бедных руд*	Выплавлено**	
	т	%		Чугуна	Стали
Китай	20800	10,46	1381,3	700,7	808,4
Япония	0	0	0	80,2	104,8
США	6400	3,22	43,1	22,3	78,5
Россия	67700	34,04	101,9	51,8	70,8
Украина	25600	12,87	81,9	23,6	24,2
Индия	20000	10,05	142,5	63,7	95,5
Бразилия	10800	5,43	422,5	26	31,2
Австралия	17600	8,85	811,2	3,6	5,3
Канада	9600	4,83	45,9	6,2	12,6
Франция	3700	1,86	н/д	9,7	14,4
Швеция	3200	1,61	24,6	3,1	4,62
Остальные	13500	6,78	н/д	н.д.	н.д.
Мировое	198900	100,0	2006,3	1165,0	1628,0

* Данные Ассоциации производителей стали (2015 г.).

** Данные Ассоциации производителей стали (2016 г.).

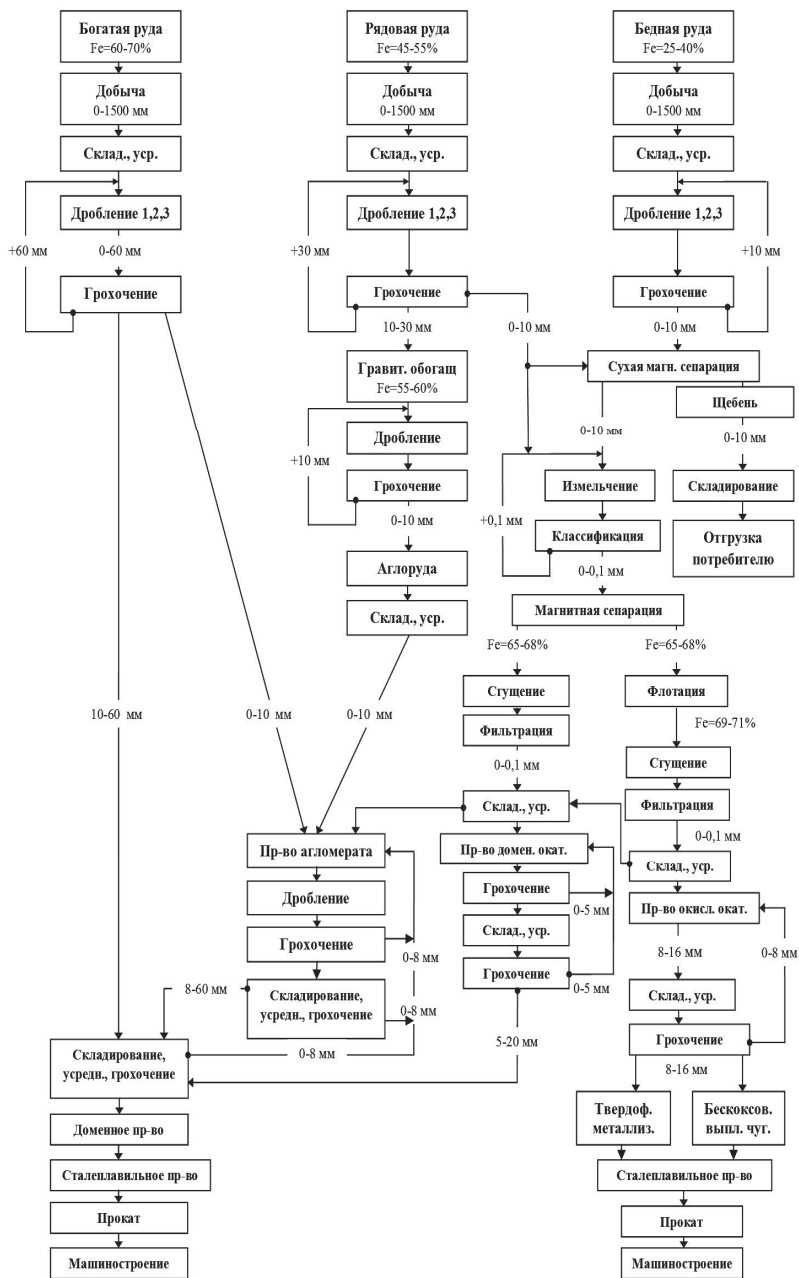


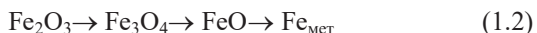
Рис 1. Технологическая схема производства металла

- б) частично восстанавливающиеся (Si, Mn, Cr, V, Ti и др);
в) не восстанавливающиеся (Ca, Mg, Al, Ba и др.).

Процесс восстановления основного элемента (железа) в доменной печи идет с постепенным отщеплением кислорода и переходом оксидов от высших степеней окисленности к низшим по следующим схемам – при температурах ниже 570 °С:



при температурах выше 570 °С:



Параллельно с процессом восстановления железа из оксидов в шахте доменной печи идет сложный процесс формирования шлаков, которому предшествует взаимодействие минералогических компонентов шихты в твердой фазе. Формированию шлаков способствует флюс (известняк, доломитизированный известняк), вводимый в доменную печь как отдельно, так и в составе железосодержащей (агломерат и окатыши) части шихты. Кусковый флюс, при опускании в доменной печи проходит стадию декарбонизации (при температурах 450-950 °С) и взаимодействия с оксидами железорудной части шихты: оксидами железа и пустой породы.

В нижней части шахты печи происходит размягчение и плавление первичного шлака, состав которого существенно отличается от конечного за счет взаимодействия с компонентами шихты при стекании в горн. В шлак переходят не восстановившиеся оксиды пустой породы рудной части шихты (SiO_2 , Al_2O_3) и оксиды флюсов (CaO , MgO). При размягчении шлаков снижается газопроницаемость столба шихты в доменной печи. Поэтому, чем богаче железорудная часть шихты оксидами железа и меньше в ней пустой породы, тем лучше газопроницаемость столба шихты в зонах шлакообразования. Расплавленный шлак стекает в горн печи и выпускается через чугунную летку вместе с чугуном в главный желоб и по шлаковым канавам отводится либо на гранустановку либо сливается в шлаковозные ковши.

Восстановленное из железорудной части в твердой фазе металлическое железо по мере опускания и дальнейшего нагрева растворяет в себе углерод в увеличивающемся количестве. При этом температура плавления его снижается, металл плавится и в виде капель стекает в горн. В горне чугун накапливается и выпускается из печи через чугунные летки в чугуновозные ковши.

В компонентах шихты доменной плавки имеются элементы, отрицательно влияющие как на технологию доменной плавки (Na, K, Zn) так и на качество чугуна и стали (S, P, Pb, Cu). Из указанных выше вредных элементов в доменной плавке удаляется только сера. Причем, в зависимости от марки выплавляемого чугуна, сера с газовой фазой из печи удаляется: при производстве передельного чугуна 5-10 %; литейного – 15-20 %; ферросплавов – до 40 %. Остальное количество се-

ры распределяется между шлаком и чугуном. Коэффициент переходы серы в шлак:

$$K_s = \frac{S_{\text{шл}}}{S_{\text{шл}} + S_{\text{чуг}}} \quad (1.3)$$

составляет для передельного чугуна 0,88-0,96; литейного – 0,97-0,99; ферросплавов – 0,99.

Исходя из выше изложенного следует, что в процессе движения материалов в доменной печи сверху вниз и физико-химического взаимодействия в условиях нагрева между твердыми фазами, твердыми и газообразными, а также твердыми, жидкими и газообразными фазами, происходит изменение газопроницаемости столба шихты и свойств исходных компонентов шихты.

Опыт работы современных доменных печей показывает, что технико-экономические показатели их работы в основном зависят от металлургических характеристик загружаемых в печь компонентов шихты: железосодержащей части (агломерат, окатыши, руда), флюсов (известняк, доломитизированный известняк) и топлива (кокс, антрацит).

В ранние периоды выплавляли чугун в доменных печах только из природных руд, металлургическая ценность которых определялась по содержанию железа, количеству и составу пустой породы (не железосодержащей части руды), содержанию вредных примесей, ухудшающих технологический процесс плавки и качество металла. Поэтому качество руд и их пригодность к доменной плавке оценивалось только по химическому составу и восстановимости.

В связи с возрастанием потребности в металле, интенсификацией технологии выплавки чугуна в доменных печах, выработкой месторождений с богатыми рудами и открытием месторождений с большими запасами бедных руд, экономически не пригодных для непосредственной выплавки из них металла, возникла необходимость в обогащении этих руд. Исходя из технологии процесса обогащения готовый обогащенный продукт (концентрат) не соответствует по крупности требованиям доменной плавки. Поэтому возникла потребность в разработке технологий и оборудования для производства из обогащенных концентратов комплексных синтезированных окускованных железосодержащих материалов (агломерат, окатыши и др.), включающих в свой состав полезные как для собственной технологии, так и для доменной плавки компоненты шихты.

В перспективе экономически и технологически целесообразно, чтобы в шихте доменной печи было только два компонента: кокс и окускованный комплексный железосодержащий продукт. Разработка технологий производства синтезированных окускованных материалов (агломерата, окатышей и др.) с контролируемыми разными составами и свойствами, предопределило необходимость определения и разработки оптимального перечня их металлургических характеристик, ме-

тодов их определения и требований к абсолютным значениям показателей каждой из этих характеристик, с точки зрения влияния каждой на эффективность выплавки чугуна в доменной печи.

Металлурги во всем мире, в этой связи, уже длительное время используют большое многообразие показателей различных металлургических характеристик железорудного материала, методов и установок для их определения [4]. Причем, требования к характеристикам испытываемых материалов, режимным параметрам испытаний и конечным результатам даже однотипных испытаний различны. Сравнить результаты даже двух однотипных испытаний, проведенных в различных лабораториях, не всегда представлялось возможным.

Многообразие компонентов шихты и показателей их металлургических характеристик, в особенности при производстве разных окускованных железорудных материалов для доменной плавки, исключает возможность объективно оценивать и сравнивать эффективность нового компонента или старого для новых параметров доменной плавки.

Для объективной оценки пригодности материала к доменной плавке, необходимо производить определение металлургических характеристик, различных железорудных материалов, по единым методикам и по режимам, максимально приближенным к режимам, воздействующим на них в доменной печи. Причем, желательно чтобы эти методы были одинаковыми для всех производителей, потребителей и исследователей окускованной железорудной продукции для выплавки металла и служили, не только для коммерческой стоимости, но и, желательно, максимально приближены к условиям воздействия на них параметров плавки, чтобы определить их поведение в доменной печи.

В настоящее время при определении металлургических характеристик окускованных железорудных материалов, используемых в доменной плавке, существуют две группы методов оценки металлургических характеристик железорудных материалов: международные методы ISO и национальные стандарты в разных странах (в СССР, а сейчас в России, Украине и Казахстане – ГОСТ; в Швеции – Линдер; в Германии и США – Лурги, во Франции – Ирсид, в Японии – Сенкен).

Причем, для определения исходных физических характеристик железорудных материалов до плавки в атмосферных условиях (пористость, плотность, прочность и др.), имитирующих их стойкость при физических нагрузках во время перегрузок при транспортировке и складировании от производящего агрегата до загрузки в доменную печь, всеми методами используются практически одинаковые параметры установок и режимы испытаний.

Различия в методах ISO и национальных стандартов (в частности ГОСТ) заключаются только при использовании температурных и газовых режимов проведения испытаний (табл. 2) при определении свойств окускованных железорудных материалов в процессе восстановительно-тепловой обработки в доменной печи.

В методах ГОСТ используются среднеарифметические значения обработанных режимов по сечению и высоте доменных печей температуры, времени пребывания при них, а также состава восстановительного газа, воздействующих на опускающийся от колошника до распара печи материал: неизотермический его нагрев и постоянный (для упрощения испытания) средний состав восстановительного газа.

Ранее такие режимы предлагались в методах некоторых национальных стандартов при определении прочности при восстановлении железорудных материалов [4].

В методах ISO используются разные изотермические температуры и постоянные составы восстановительного газа, свои для каждого метода. Эти методы могут использоваться только для принципиального ранжирования разных материалов по этим показателям, но не для изучения их поведения в разных частях доменной печи.

Методы оценки исходных физико-механических свойств и свойств в процессе восстановления окускованных железорудных материалов должны характеризовать физические нагрузки, воздействующие на них в процессе их транспортировки от производителя до уровня засыпи на колошнике доменной печи, а также физическое, тепловое и химическое воздействие в процессе опускания материала от уровня засыпи до металлоприемника доменной печи.

Принципиальное конструктивное оформление основных стандартных методов оценки металлургических характеристик окускованных железорудных материалов для доменной плавки приведены на рис. 2-7.

Важна также потребность в разработке технологически и экономически целесообразных современных требований к комплексу металлургических характеристик окускованного железорудного материала (руды, агломерата, окатышей и др.), обеспечивающих эффективную работу разных уровней (колошника, шахты и распара) доменной печи, а также экономически целесообразную возможность и заинтересованность производить этот материал – в данном случае агломерат и окатыши, а также новые виды окускованных железосодержащих материалов, и потребителей – доменное производство. То есть нужна взаимная экономическая заинтересованность производителей и потребителей окускованного железорудного материала в производстве и потреблении высококачественного продукта.

В 1987 г. на основании опыта работы доменных цехов, МЧМ СССР были сформулированы величины некоторых абсолютных значений показателей металлургических характеристик (содержание Fe, S, мелочи, основность) загружаемых в печь агломератов и окатышей, а также определенные пределы их изменения, влияющие на абсолютные значения производительности и расхода кокса доменной печи [5]. Эти значения закладывались производителями в стоимость агломератов и окатышей.

Таблица 2. Стандартные (ГОСТ, ДСТУ, ISO, ДСТУ-ISO) методы изучения металлургических характеристик окискованных (руда, агломерат, окатыши и др.) железорудных материалов для доменной плавки

Наименование условий и показателей при испытании	Название метода, № стандарта										Конечная степень восстановления, восстановления ГОСТ 17212-84 ДСТУ 3204-95 ISO 7215:2007 ДСТУ ISO 7215: 2008 ISO 4695:2007 ДСТУ ISO 4695: 2008
	Прочность на сжатие ГОСТ 24765-81 ДСТУ 3206-95 ISO 4700:1996 ДСТУ ISO 4700: 2005	Прочность на удар и истирание ГОСТ 15137-77 ДСТУ 3200-95 ISO 3271:1995 ДСТУ ISO 3271: 2005	Температура начала и ин-тервал размяг-чения*	7	8	9	10	11	12	13	
1			6								
Установка	Пресс	Пресс	Вертик. камера, печь	Горизонт. камера, печь	Горизонт. камера, печь	Вертик. камера, печь	Вертик. камера, печь	Вертик. камера, печь	Вертик. камера, печь	Вертик. камера, печь	
Размеры установки, мм	–	–	Не регламент.	$d_{\text{вн}} 1000 \times 500$	$d_{\text{вн}} 145 \times 200$	$d_{\text{вн}} 150 \times 540$	$d_{\text{вн}} 76 \times 65 \times 800$	$d_{\text{вн}} 76 \times 65 \times 800$	$d_{\text{вн}} 75 \times 800$	$d_{\text{вн}} 75 \times 800$	
Отбор и подготовка образцов, кг	по ГОСТ 26136-84	по ISO 3082 1,0 кг	по ГОСТ 26136-84	по ISO 3082 ≥ 60 кг	по ГОСТ 26136-84	по ISO 3082 2,0 кг	по ГОСТ 26136-84	по ISO 3082 2,5 кг	по ISO 3082 2,5 кг	по ISO 3082 2,5 кг	
Размер окатышей в пробе, мм	10-20 $X_{\text{ср}} \pm 2$	10,0-12,5	3-5	5-25	10-20	10-2,5	10-20	10-12,5	10-12,5	10-12,5	
Масса пробы для единичного исп.	≥ 30 шт.	≥ 60 шт.	Не регламент.	$15 \pm 0,15$ кг	0,5 кг	0,5 кг	1,0-1,2 кг	0,5 кг	0,5 кг	0,5 кг	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Нагрузка на пробу (скорость сжатия или вращения)	≤ 75 мм/мин	10-20 мм/мин	25±1 об/мин	25±1 об/мин	0,1 МПа	10 об/мин	10 об/мин	0,1 МПа	0,05 МПа	–	–	–
Интервал нагрева печи, °С	–	–	–	–	25-1400	25-1000	25-700	25-1300	25-1300	25-1300	25-1100	25-1100
Температурный интервал, °С и скорость нагрева пробы, °С/мин.	–	–	–	–	>800 °С и 10	25-600°С и 15,0; 600-800°С и 2,86	Изотермический 500 °С	25-600°С и 15,0; 600-1050 °С и 2,86	Изотермический 1050 °С	25-600°С и 15,0; 600-1100 °С и 2,86	Изотермический 900 °С	Изотермический 950 °С
Состав газа, %	–	–	–	–	Н, О, В	СО – 33 N ₂ – 65	СО – 20 СО ₂ – 22 Н ₂ – 2 N ₂ – 58	СО – 33 N ₂ – 65	СО – 40 N ₂ – 60	СО – 33 N ₂ – 65	СО – 30 N ₂ – 70	СО – 40 N ₂ – 60
Объемная скорость газа, дм ³ /мин	–	–	–	–	0,5	15,0	20,0	50,0	83,0	30,0	15,0	50,0
Время испытания, мин	–	–	8,0	8,0	Не регламент.	180,0	60,0	200	*** 80 %	215	180	*** 65 %
Результаты испытания	X _{ср}	X _{ср}	+5 мм -0,5 мм	+6,3 -0,5 мм	1 усад- ки слоя от 1 до 40%	+10 мм, 0,5-5 мм 0-0,5 мм	+6,3 мм 3,15-6,3 0,5-3,15 мм	ΔН, мм ΔР, Па R _{факт} , %	ΔН, мм ΔР, Па R, %	R _{факт} , %	R ₁₈₀ , %	dR/dt O/Fe=0, 9=33,6/(t ₆₀ -t ₃₀)

* ГОСТ 26517-85; ДСТУ 3817-98. ** Н – нейтральный, О – окислительный, В – восстановительный. *** До достижения степени восстановления. Колонки: 2, 4, 6, 7, 9, 11 – ГОСТ, ДСТУ; 3, 5, 8, 10, 12, 13 – ISO, ДСТУ ISO.

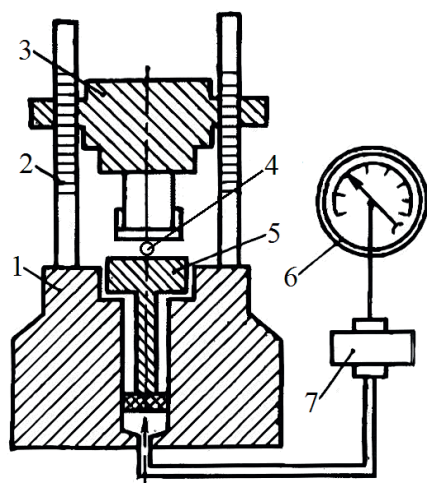


Рис. 2. Схема установки для определения прочности окатыша на сжатие: 1 – пресс; 2 – направляющие пресса; 3 – предварительное прижатие; 4 – окатыш; 5 – подвижная часть пресса; 6 – прибор, фиксирующий нагрузку; 7 – регулятор нагрузки

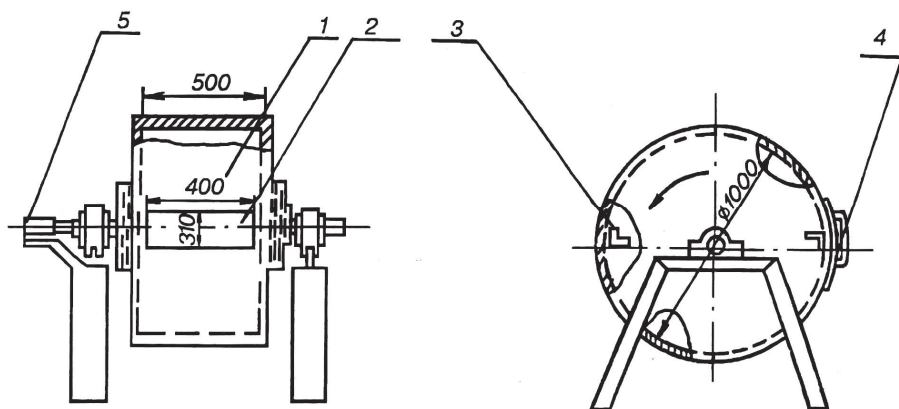


Рис. 3. Установка для определения прочности и истираемости исходных железорудных материалов: 1 – барабан, 2 – загрузочный люк, 3 – уголки, 4 – крышка люка, 5 – счетчик оборотов

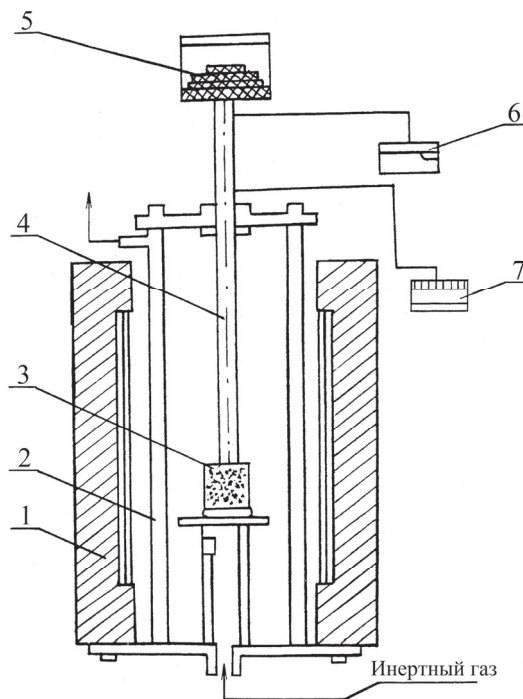


Рис. 4. Установка для определения температуры начала и интервала размягчения: 1 – нагревательная печь; 2 – нагревательная камера; 3 – тигель с пробой; 4 – шток с подпятником; 5 – груз; 6 – устройство регулировки и контроля температуры нагрева пробы; 7 – прибор для автоматической записи температуры пробы и перемещения штока

В этих требованиях в частности отмечено, что при увеличении содержания железа в шихте на каждый 1 % увеличивается производительность печи на 1,7-2,4 % и снижается расход кокса на 1,0-1,4 %; при уменьшении расхода сырого флюса на каждые 10 кг/т чугуна увеличивается производительность печи на 0,4-0,5 % и снижается расход кокса на 0,4-0,5 %; при уменьшении содержания серы в шихте на каждые 0,01 % увеличивается производительность печи на 0,3 % и снижается расход кокса на 0,3 %; при уменьшении содержания фракции 0-5 мм в шихте на каждый 1,0 % увеличивается производительность печи на 1,0 % и снижается расход кокса на 0,5 %.

Кроме того, подчеркивается необходимость иметь в составе компонентов шихты доменных печей минимальное (сотые и тысячные доли процента) количество удаляемых и не удаляемых в процессе доменной плавки вредных приме-

сей (S, P, Na, K, Zn,), ухудшающих режим работы доменной печи и качество чугуна.

Также, казалось бы, однозначно положительный фактор для доменной плавки – увеличение содержания железа в железорудном материале не является положительным во всем диапазоне от минимальных до максимальных значений. Так с точки зрения обогащения руды имеется оптимум затрат на ее обогащение и себестоимости чугуна в доменной плавке (рис. 8) [6].

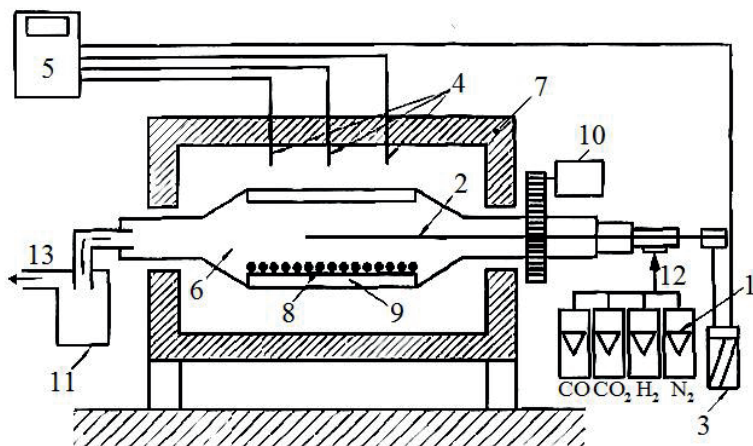


Рис. 5. Установка для определения прочности и истираемости железорудных материалов в процессе восстановления:

1 – измерители расхода газа; 2 – термопара в реакционной камере; 3 – прибор регистрации температуры; 4 – термопары для измерения температуры в печи; 5 – регулятор температуры в печи; 6 – реакционная камера; 7 – печь; 8 – проба; 9 – уголки в реакционной камере; 10 – электродвигатель; 11 – пылеуловитель; 12 – вход восстановительного газа; 13 – выход отработанного газа

Однако, в выше указанных требованиях совершенно не отмечены показатели изменения свойств агломератов и окатышей в процессе их восстановительно-тепловой обработки в доменной печи: обеспечение оптимальных газодинамических условий работы доменной печи за счет соответствующей фракции, сохранения необходимых прочностных характеристик в процессе восстановительно-тепловой обработки при требуемой восстановимости в области умеренных и высоких температур, повышение температуры начала размягчения и сужения температурного интервала “размягчение-плавление”; наличие стабильных показателей при их минимальном изменении, существенно влияющих на эффективность работы доменной печи.

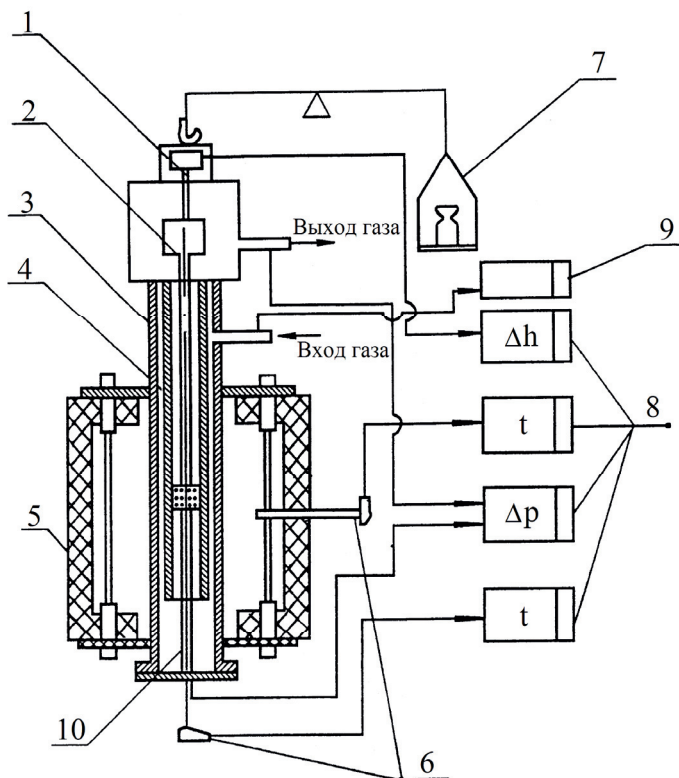


Рис. 6. Установка для определения газопроницаемости и усадки слоя при восстановлении: 1 – датчик для регистрации высоты слоя; 2 – шток с грузом; 3, 4 – внешняя и внутренняя стенка реакционной камеры; 5 – электропечь; 6 – термопары; 7 – взвешивающее устройство; 8 – измерительные приборы; 9 – регулятор подачи восстановительного газа; 10 – держатель навески

Впервые, на основании опыта работы доменных печей, под руководством З.И. Некрасова сформулированы требования к комплексу показателей металлургических характеристик, которым должно удовлетворять железорудное сырье, обеспечивающее эффективную работу доменных печей [7, 8]: наличие экономически целесообразного содержания железа с соответствующим содержанием кислых (SiO_2 , Al_2O_3) оксидов; основности близкой к основности шлака исключающей ввод в доменную печь сырого флюса; способность выдерживать, не разрушаясь, значительное количество перегрузок, транспортировку от производителя к потребителю и длительное хранение на складах при разных атмосферных условиях, сохраняя при этом требуемые прочностные свойства; обеспечение оптимальных газодинамических условий работы доменной печи за счет соответствующей фракции, сохранения необходимых прочностных характеристик в про-

цессе восстановительно-тепловой обработки при требуемой восстановимости в области умеренных и высоких температур; повышение температуры начала размягчения и сужения температурного интервала “размягчение-плавление”; наличие стабильных показателей при их минимальном изменении.

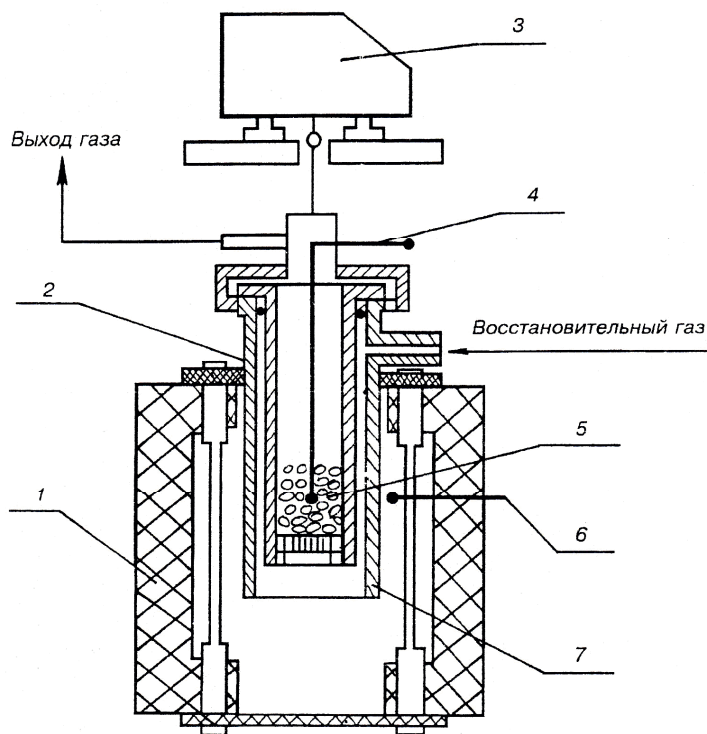


Рис. 7. Установка для определения скорости и конечной степени восстановления слоя железорудных материалов: 1 – электропечь; 2 – реакционная камера; 3 – взвешивающее устройство; 4, 6 – термоэлектрические термометры; 5 – проба; 7 – перфорированная пластина

Исходя из этих предпосылок, сформулированы требования к металлургическим характеристикам синтезированных (агломерат, окатыши) окускованных железорудных компонентов доменной шихты, обеспечивающие максимальные технико-экономические показатели выплавки чугуна в доменной печи (табл. 3).

Указанные выше методы ГОСТ и ISO имеют большое значение для характеристики поведения окатышей при восстановительно-тепловой обработке в верхней и средней “сухих”, а также в вязкопластической зонах доменной печи.

Однако, большое значение имеют также знания поведения железорудного окускованного материала в момент плавления шлака. Следовало бы оценить

эти показатели в технологическом (производительность печи, расход кокса), энергетическом и стоимостном значении окискованного материала.

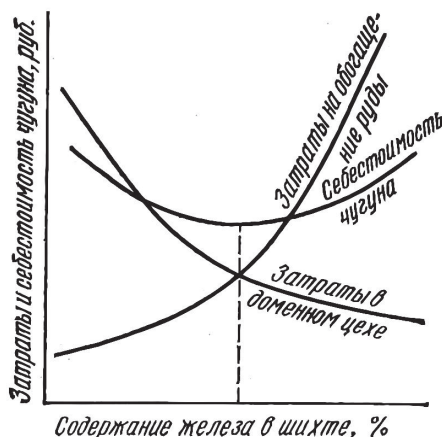


Рис. 8. Влияние содержания железа в шихте доменной печи на себестоимость выплавки чугуна

При изучении указанных свойств на специальной установке (рис. 9) специалисты ИЧМ НАНУ установили струйный характер течения шлака в коксовой насадке и показали, что скорость течения шлаков в насадке неустойчива и зависит от хода восстановления FeO в шлаке и образования на этой основе гетерогенной смеси, удерживаемой в насадке капиллярными силами [9].

Установлена сильная зависимость течения шлака в коксовой насадке от процесса восстановления FeO и показано, что увеличение размера элементов насадки положительно влияет на фильтруемость шлака лишь до определенного значения, выше которого это влияние нивелируется повышением гетерогенности расплава за счет увеличения скорости восстановления FeO . При изучении динамики изменения состояния материалов в ходе нагрева с последующей фильтрацией расплавов через коксовую насадку на установке (рис. 9), в которой предварительно восстановленные по ГОСТ 21707-76 материалы загружались между слоями кокса и нагревались со скоростью 30 град./мин до 1000 °С, затем – 7 град./мин до 1600 °С.

При исследовании различных шихтовых материалов было установлено, что в процессе фильтрации расплавов через коксовую насадку происходит сегрегация компонентов, в ходе которой часть расплава вытекает, другая остается в насадке в виде тугоплавкой массы, причем обе части гетерогенны. Остаток в насадке (6-48 % по массе) включает шлаковую и железоуглеродистую составляющие и характерен наличием повышенного количества CaO , MgO , C и пониженного – FeO в отличие от профильтровавшейся части, где меньше CaO , C и больше FeO .

Таблица 3. Современные требования доменной плавки к металлургическим характеристикам агломерата и окатышей

Наименование показателей		Агломерат	Окатыши
1		2	3
1. Химический состав			
1. Содержание железа, %		Экономически максимально	Экономически максимально
2. Содержание вредных (S, P) примесей, %		Менее 0,05	Менее 0,05
3. Основность, ед.		Экономически целесообразная	Экономически целесообразная
2. Стабильность состава			
1. Допустимые колебания содержания железа, ± %		0,25	0,25
2. Допустимые колебания закисы железа, ± %		1,00	0,50
3. Допустимые колебания основности, ± д. ед.		0,05	0,025
3. В холодном (исходном) состоянии			
1. Прочность при сжатии, ДаН/ок ГОСТ 24765-81; ДСТУ 3206-95; ДСТУ ISO 4700:2005		Не опред.	Не менее 200,0
2. Содержание в отгружаемой продукции окатышей с прочностью на сжатие более 200,0 ДаН/ок, %		–	Не менее 90,0
3. Коэффициент прочности (+5 мм), %. ГОСТ 15137-77; ДСТУ 3200-95; ДСТУ ISO 3271:2005		Не менее 80,0	Не менее 95,0
4. Коэффициент истираемости (0-0,5 мм), %. ГОСТ 15137-77; ДСТУ 3200-95; ДСТУ ISO 3271:2005		Не более 4,0	Не более 3,0

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛА.....	7
2. ПРИРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ВЫПЛАВКИ МЕТАЛЛА.....	26
2.1. Строение и средний состав Земли.....	26
2.2. Процессы минералообразования.....	30
2.3. Процессы рудообразования.....	30
2.4. Железо- и марганецсодержащие руды.....	32
2.4.1. Железные руды.....	33
2.4.2. Марганцевые руды.....	36
2.5. Metallургические флюсы.....	40
2.6. Связующие добавки.....	41
2.7. Топливо.....	43
3. УСРЕДНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ОКАТЫШЕЙ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСРЕДНЕНИЯ.....	46
3.1. Теоретические основы усреднения.....	46
3.2. Технология и оборудование для усреднения на открытых складах большой ёмкости.....	49
4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, ТЕХНОЛОГИЯ, И ОБОРУДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДРОБЛЕНИЯ, КЛАССИФИКАЦИИ, ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД.....	59
4.1. Дробление руд.....	61
4.2. Классификация сыпучих материалов и пульп.....	97
4.2.1. Вибрационные грохоты с неоднородным полем траекторий рабочего органа.....	119
4.2.2. Вибрационные грохоты с пространственными колебаниями сеющей поверхности.....	121
4.2.3. Вероятностные вибрационные грохоты для отсева продуктов дробления руды высокой влажности.....	123
4.2.4. Перспективные конструкции кольцевых грохотов и дробильно-сортировочных комплексов	129
4.3. Грохочение пульп при производстве железорудных концентратов.....	137
4.4. Гидроклассификация и пневмосепарация.....	143
4.5. Измельчение материалов.....	152
4.6. Обогащение полезных ископаемых.....	167
4.6.1. Гравитационные методы.....	170
4.6.2. Магнитная сепарация.....	178
4.6.3. Флотация.....	186
4.6.4. Обезвоживание железорудных концентратов.....	196
4.6.5. Обжиг руд и флюсов, сушка концентратов.....	208

5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОСНОВНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ В ПРОИЗВОДСТВЕ СЫ- РЫХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ.....	210
5.1. Характеристика компонентов шихты для производства ока- тышей.....	210
5.2. Подготовка по крупности, дозирование и смешивание компо- нентов шихты.....	219
5.2.1. Подготовка по крупности компонентов шихты.....	219
5.2.2. Дозирование.....	228
5.2.3. Смешивание шихты.....	231
5.3. Получение сырых окатышей.....	242
5.3.1. Основы теории окомкования тонкоизмельченных материа- лов.....	242
5.3.2. Механизм и динамика процесса окомкования.....	250
5.3.3. Основное технологическое оборудование для получения сырых окатышей.....	259
5.3.4. Влияние технологических свойств компонентов шихты на показатели качества сырых и обожженных окатышей.....	274
5.3.5. Связующие добавки при производстве железорудных ока- тышей.....	282
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	317
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	319
СОДЕРЖАНИЕ.....	327