

Разаз Юнес, И.А. Опрышко, канд.техн.наук, П.И. Лобода², д-р техн.наук
1-ООО Харес Инжиниринг Украина;
2-НТУ України «Київський політехнічний інститут» м.Київ, Україна

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПРЯМОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЕЧЕЙ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ПОДОМ

Розглянуто стан виробництва залізної руди, чавуну і сталі. У зв'язку із різким скороченням кількості доменних печей та закриттям заводів прямого відновлення заліза з газу – фазною технологією Midrex у країнах Північної Америки та Євросоюзу актуальними стають технології прямого відновлення заліза з вугіллям у якості відновника. У роботі розглядається історія розвитку технології прямого відновлення заліза ITmk3, в якій застосовується піч з обертовим черенем, та наводяться результати лабораторних досліджень з основними українськими залізрудними концентратами, виконаних Hares Engineering і Kobe Steel.

В результаті лабораторних досліджень визначені різні варіанти шихтовки, що забезпечують різні показники процесу, наприклад мінімальний вміст сірки у чавуні, або максимальну продуктивність. Визначено вплив вуглецю, CaO та плавикового шпату на хід технології ITmk3. Визначено рекомендовані характеристики залізрудного концентрату та гарантовані показники продукції.

Показано, що технологія ITmk3 забезпечує набагато кращі екологічні показники у порівнянні з доменним виробництвом.

Показані технологічні схеми заводів прямого відновлення оксидів металів з піччю з обертовим черенем.

Залізна руда, залізрудний концентрат, прямо відновлене залізо, чавун, гранульований чавун, вугілля, вуглець, itmk3, midrex, hares engineering, kobe steel, midrex, хімічний склад, сірка, гранулометричний склад, піч з обертовим черенем, технологічна схема

A production status of iron ore, iron and steel is considered. In connection with a great reduction of the blast furnaces quantities and closing down the DRI plants with the gas-phase Midrex process in North American and European countries the direct iron reduction plants using the coal as a reducer become an actual ones. In the article the history of ITmk3 process using a Rotary Hearth Furnace is shown and the results of laboratory tests fulfilled by Hares Engineering and Kobe Steel companies with the main Ukrainian iron ore concentrates are given.

In a result of the laboratory tests are determined the charge compositions which provide the different process characteristics, for example minimal sulfur content in the iron or maximal capacity of the plant. An influence of a carbon, CaO and fluorspar is determined. A recommended iron ore concentrate specifications and guarantee product indices are determined.

It is shown that ITmk3 process provides much better ecological indices in compare with the blast furnace plant.

The process flow-diagrams of the metal oxides direct reduction plants using the rotary hearth furnaces are shown in the article.

Iron ore, iron ore concentrate, direct reduced iron, pig iron, iron nuggets, coal, carbon, itmk3, midrex, hares engineering, kobe steel, midrex, chemical composition, sulfur, granulometric, rotary hearth furnace, process flow-diagram

Всемирное производство железной руды достигает сейчас 1,9 млрд. тонн в год.

В соответствии с оценками Международного института чугуна и стали (IIS) годовой уровень электросталеплавленного производства возрастет в 2015 году до 658 млн. тонн, а производство конверторной стали до 1143 млн. тонн, при этом годовое потребление, используемых в сталеплавильных цехах металлургических продуктов составит 1300 млн. тонн чугуна, 617 млн. тонн стального лома и 93 млн. тонн прямо – восстановленного железа.

При этом имеет место тенденция значительного роста рыночного спроса на высококачественные стали при одновременном сокращении предложения высококачественного стального лома. Поэтому ведущие металлургические компании в течение последних десятилетий прикладывают значительные усилия к разработке альтернативных металлургических технологий, которые обеспечили бы получение железа повышенной чистоты.

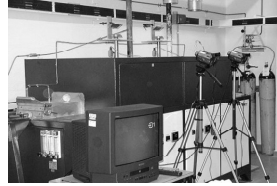
Хотя в настоящее время объемы производства чугуна в доменных печах значительно превышает любые другие технологии, тем не менее имеется тенденция сокращения количества доменных печей в США и Европейских странах в основном из-за требований улучшения экологии, возрастающего дефицита кокса и стремления сократить расход энергии [1].

В настоящее время среди технологий прямого восстановления доминируют газо – фазовые процессы, такие как Midrex, HyL, и др., составляющие около 85% мирового объема. Поскольку возрастающие цены на природный газ в высокоразвитых странах Северной Америки и Европы сегодня уже превышают 11 \$/ГДж (около 400\$ за 1000 н.м³) при удельном потреблении до 15 ГДж/т прямо-восстановленного железа, (около 420 н.м³ /т), что приводит к резкому ухудшению экономическому показателю этих процессов. Поэтому все заводы прямого восстановления железа, в которых в качестве восстановителя используется природный газ, были закрыты в высокоразвитых странах Северной Америки и Европы, а новые установки Midrex сегодня строятся только в странах, где природный газ все еще дешевый, таких как Индия, Иран, Россия, Тринидад и Тобаго и некоторые другие[1].

Эволюция технологий прямого восстановления до их сегодняшнего состояния включает более 100 различных концепций технологий прямого восстановления, большинство из которых были только экспериментальными, и работы по ним были прекращены из-за технических проблем или экономической нецелесообразности [2, 3]. Однако, некоторые технологии были успешными и последовательно совершенствовались до полномасштабной коммерческой эксплуатации. Ниже представлена история развития технологии прямого восстановления железа ITmk3, в которой используется печь с вращающимся подом, а в качестве восстановителя используется уголь [4, 5, 6].



1996 г – открыт феномен ITmk3 в лаборатории з-да Kakogawa



1996 -1998 гг – лабораторные исследования в камерной печи в лаборатории Nishin Kobe Steel



1999 – 2000 гг – исследования на опытной установке (3000 т/г), на з-де Kakogawa



2001 – 2004 гг исследования на опытно-демонстрационном з-де Mesabi Nuggets, США (25 000 т/г)



Январь 2010 г – Первый в мире коммерческий завод ITmk3 Mesabi Nuggets, штат Миннесота, США введен в эксплуатацию



12 января 2010 г – получена первая продукция на коммерческом з-де ITmk3, Mesabi Nuggets, штат Миннесота, США

Hares Engineering начал работы по созданию завода прямого восстановления железа по технологии ITmk3 в 2006 г. В 2006 г совместно с лабораторией Nishin, Kobe Steel Ltd были проведены лабораторные исследования с тремя видами железорудных концентратов, с общим содержанием железа 70%, 68% и 65%, с двумя видами углей с содержанием золы 5% и 23% и традиционно используемыми в металлургии флюсовыми материалами [7]. Химические составы ЖРК, углей и флюсовых материалов приведены в таблицах 1, 2, 3 и 4, соответственно.

Таблица 1

Химический состав железорудных концентратов

	Fe 70%	Fe 68%	Fe 65%
Общ. Fe	70,27	68,39	64,98
FeO	29,16	27,53	27,55
SiO ₂	2,21	4,46	8,21
CaO	0,07	0,10	0,26
Al ₂ O ₃	0,12	0,14	0,15
MgO	0,14	0,19	0,51
S	0,048	0,081	0,062

Таблица 2

Химический состав восстановительного угля

Восстановительный уголь		5% золы	23% золы
Экспресс анализ	Летучие	5,30	7,92
	Зола	5,60	23,56
	Связанный углерод	89,02	68,52
	Общая сера	0,969	2,00

Таблица 3

Элементный состав восстановительного угля			
Анализ золы	Fe ₂ O ₃	18,54	11,85
	SiO ₂	41,31	51,97
	Al ₂ O ₃	16,74	24,36
	CaO	7,19	1,86
	MgO	2,95	1,50
	TiO ₂	0,57	0,92

Таблица 4

Химический состав флюсов, (%)							
Флюс	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaF ₂	TS	LOI
Известняк	55,94	0,26	0,03	0,19	-	0,005	43,31
Доломит	31,0	20,41	1,42	0,36	-	0,01	46,61
Плавленый шпат	-	0,09	3,39	0,44	96,04	-	-

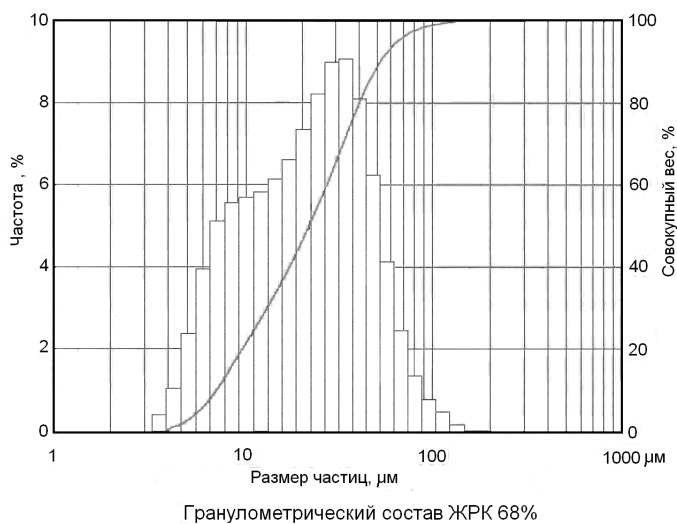


Рис. 1. Гранулометрический состав железорудного концентрата

Гранулометрический состав ЖРК 68% приведен на рис. 1.

При проведении лабораторных испытаний ставилась задача подобрать такое соотношение ЖРК, угля и флюсовых материалов, чтобы обеспечить получение максимально возможной производительности или минимально возможного содержания серы в чугунах.

На рис. 2 представлена схема лабораторной установки [6].

Программа испытаний включала:

- Анализ образцов сырьевых материалов – железорудных концентратов, восстановительных углей и флюсов;
- Испытания рудно-флюсо-угольных окатышей;
- Испытания рудно-флюсо-угольные окатышей в камерной печи;
- Испытания готовой продукции (гранулированный чугун и шлак);
- Анализ состава отходящих газов.

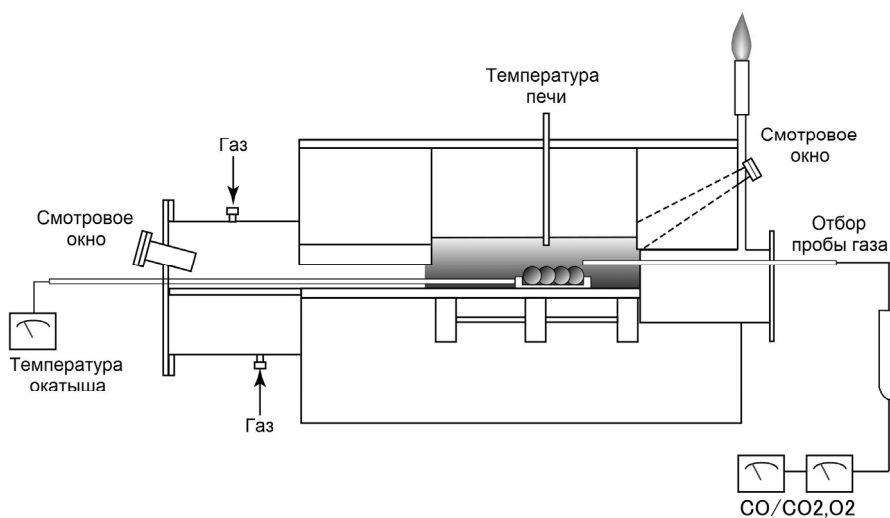


Рис. 2. Схема лабораторной установки Nishin с камерной электропечью

Для создания атмосферы в камерной печи, аналогичной атмосфере промышленной печи с вращающимся подом, в печь подается газ азот.

При испытаниях непрерывно контролируются температура окатышей, температура печи и состав отходящих газов, а также непрерывно осуществляется видеозапись процессов, происходящих в печи.

Рудно-флюсо-угольные окатыши в лабораторной печи или в промышленной кольцевой печи с вращающимся подом нагреваются, восстанавливаются и плавятся при температуре приблизительно 1450°C, превращаясь в разделенные гранулы чугуна и шлака. Шлак окончательно отделяется от чугуна после конечной стадии охлаждения. Весь процесс от загрузки окатышей в печь до выгрузки из печи длится 8...12 мин.

На рис.3 представлены изменение температуры окатышей и содержания CO и CO₂ в атмосфере печи при проведении лабораторных испытаний технологии ITmk3. Как видно из рис.4, процесс восстановления завершился через 6,5 мин, а время плавления окатышей было 1450°C.

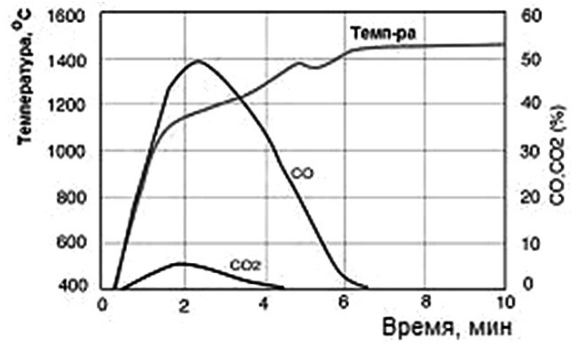


Рис. 3. Изменение температуры окатышей и содержания CO и CO₂ в печи

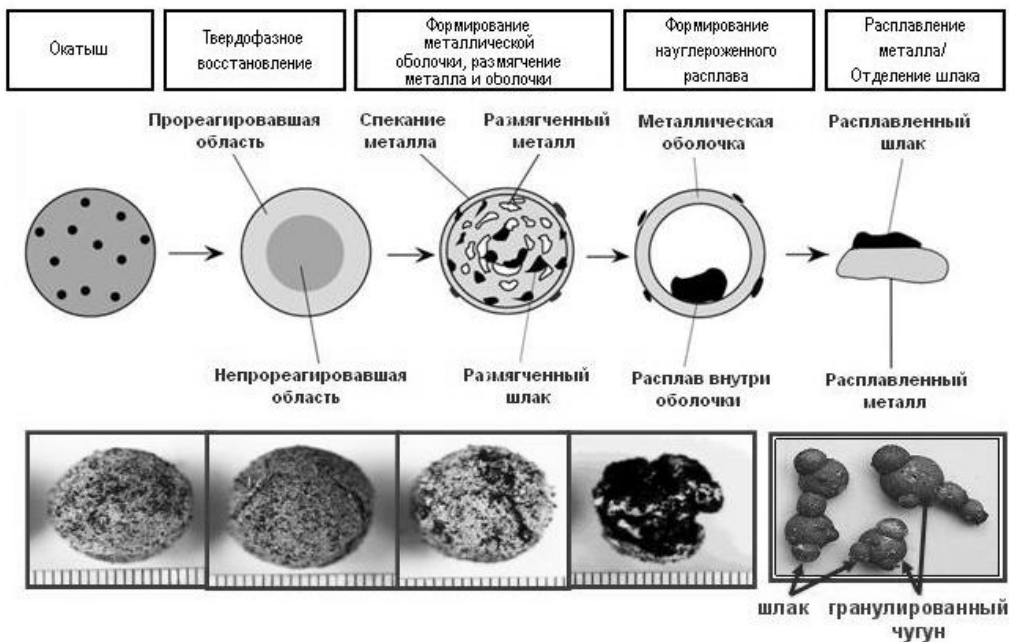


Рис. 4. Схема механизма восстановления-плавления рудно-флюсо-угольных окатышей

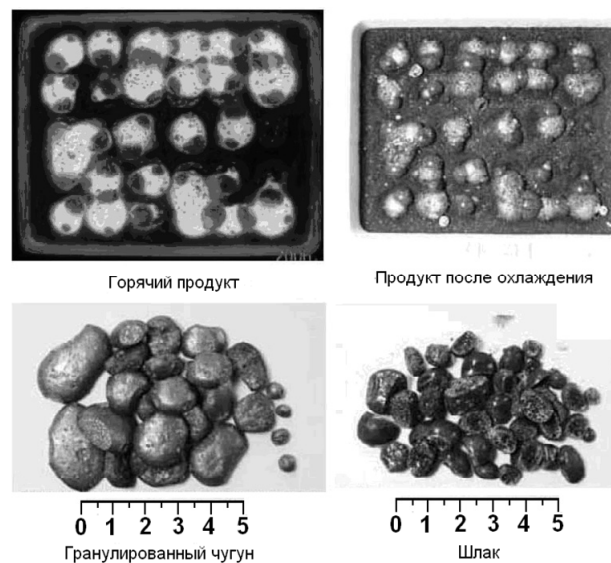


Рис. 5. Фотографии, горячего продукта после выгрузки из лабораторной печи, продукта после охлаждения и после магнитной сепарации

Результаты лабораторных испытаний представлены в табл.5

Таблица 5

Результаты лабораторных испытаний ЖРК 70, 68, 65% в технологии ITmk3

ЖРК Fe70%	ЖРК Fe68%	ЖРК Fe65%	Уголь 5%зола	Уголь 23%зола	Извест-няк	Доло-мит	Боксит	Флюо-рит	Связу-ющее	Чугун			Шлак кг/тч
										Fe %	C %	S %	
-	73,78	-	15,42	-	7,80	-	1,0	1,0	1,0	96,7	2,80	0,129	209,2
-	72,04	-	16,46	-	6,10	3,05	0,65	0,8	0,9	96,4	3,33	0,062	210,8
-	67,36	-	-	18,39	11,60	-	0,65	1,0	1,0	97,4	1,97	0,247	324,3
-	64,85	-	-	19,44	9,34	4,67	-	0,8	0,9	96,1	3,49	0,040	338,8
77,22	-	-	17,38	-	3,40	-	-	1,0	1,0	97,5	1,91	0,200	101,0
-	71,29	-	-	20,87	6,84	-	-	-	1,0	97,8	1,46	0,325	192,2
-	-	76,31	15,89	-	5,8	-	-	1,0	1,0	97,2	2,09	0,337	249,3
-	-	73,04	-	19,76	6,2	-	-	-	1,0	97,6	1,40	0,639	304,1
-	74,07	-	15,43	-	7,5	-	1,0	1,0	1,0	96,9	2,59	0,115	207,8
-	74,87	-	14,63	-	7,5	-	1,0	1,0	1,0	97,1	2,41	0,154	208,8
-	67,95	-	-	18,45	11,0	-	0,6	1,0	1,0	97,8	1,56	0,221	320,5

Из результатов испытаний, представленных в табл. 5, видно, что содержание серы в чугуне изменялось в широких пределах от 0,04% до 0,639%, а производство шлака изменялось от 101,0 кг/тч до 338,8 кг/тч.

Результаты исследования теплового баланса технологии ITmk3, представленные на рис.6, показывают, что по сравнению с технологией Midrex резко сокращается расход природного газа. Энергия, получаемая за счет горения природного газа, составляет около 21,3 % от суммарной энергии. В первом коммерческом заводе Mesabi Nuggets утилизируется примерно четвертая часть энергии отходящих газов путем использования их для подогрева воздуха горения. В настоящее время Hares Engineering совместно с фирмой Küttner, Германия выполняют исследовательские и проектные работы по полной утилизации энергии отходящих газов, которая позволит обеспечить электроэнергией работу всего завода ITmk3.

В течение 15 лет лабораторных исследований технологии ITmk3 были испытаны практически все типы железных руд, встречающиеся в Азии, Америке, Европе и Африке [6], в том числе Hares Engineering совместно с Kobe Steel Ltd выполнил испытания ЖРК всех работающих в странах СНГ ГОКов.

В результате испытаний было определено влияние различных факторов на производство гранулированного чугуна.

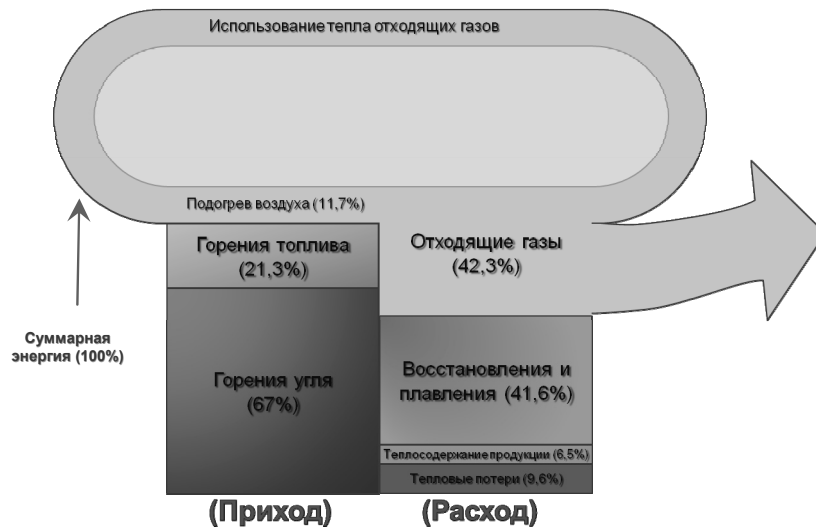


Рис. 6. Тепловой баланс получения гранулированного чугуна по технологии ITmk3

Влияние углерода.

Для того, чтобы быстро расплавить восстановленное железо, в нём после твёрдого восстановления должно остаться достаточное количество углерода для науглероживания.

Избыточное содержание углерода в окатыше необходимо по следующим причинам. Во-первых, наличие избыточного углерода увеличивает процентное содержание и количество окиси углерода, что содействует процессу восстановления и увеличивает количество карбида железа, который образуется за счет реакции углерода с восстановленным железом. Во-вторых, наличие избыточного углерода

создаёт возможность протекания необходимых реакций в окатышах не зависимо от состава атмосферы в печи над окатышами, которая создаётся работой газовых горелок. Это позволяет обеспечить полное сжигание природного газа и минимизировать тепловые потери от сжигания, потому что избыточный углерод в окатышах защищает восстановленное железо и карбид железа от повторного окисления двуокисью углерода из атмосферы печи.

Содержание избыточного углерода определяется количеством железной руды и углеродосодержащего вещества (угля), которые используются для изготовления окатышей. Когда количество угля задаётся таким, чтобы количество остаточного углерода в момент полной металлизации составляло 1,5%, восстановленное железо может быстро науглероживаться, что приводит к снижению его температуры плавления. Таким образом, восстановленное и расплавленное железо может быстро формироваться в гранулы необходимого размера путём когезии и слияния при температуре 1350...1450°C. Следует отметить, что при содержании углерода меньше 1,5%, точка плавления

железа существенно не снизится из-за недостатка углерода для науглероживания и температура нагрева в этом случае должна быть увеличена до 1500°C и более.

Для того, чтобы гарантировано получать гранулированный чугун с содержанием углерода от 2,0 до 4,0%, избыточное содержание углерода после полного восстановления должно регулироваться в диапазоне 2,5...4,5%.

Влияние CaO содержания материалов. Уголь обычно содержит около 0,2...1,0% серы. Основная масса серы, из угля переходит в металлический гранулированный чугун. В шлак, с низкой основностью сера не может перейти из металлического железа в процессе твердого восстановления и последующих процессов науглероживания, плавления и когезии. Приблизительно 85% общего количества серы в окатышах перейдет в металлическое железо, что приведет к снижению качества конечного продукта.

В результате обширных экспериментальных исследований, проведенных в лаборатории Nishin, получены следующие рекомендации:

- При изготовлении окатышей без добавления материалов с CaO, 74,8% серы поступает в чугун и только 10,2% в шлак. Приблизительно 15% серы удаляется с отходящими газами.

- Когда компоненты окатышей позволяли получать шлак с основностью 1,15 за счет добавления 3% CaO, количество серы, попадающей в чугун, снижается до 43,2%, а количество серы в шлаке возрастает до 48,8%. Количество серы, которое удаляется с отходящими газами, снижается до 8%.

- Когда компоненты окатышей позволяли получать шлак с основностью 1,35 за счет добавления 5% CaO, количество серы, попадающей в чугун, снижается до 18,7%, а количество серы в шлаке возрастает до 78,8%. Количество серы, которое удаляется с отходящими газами, снижается до 1,5%.

Плавленый шпат. Когда плавленый шпат добавляется в окатыши, точка плавления шлака, снижается и жидкотекучесть шлака резко возрастает. В следствие этого, когда расплавленное металлизированное железо формируется в гранулы, расплавленный шлак не блокирует когезию расплавленного железа. Расплавленное металлизированное железо может эффективно объединяться и формировать относительно большие гранулы.

Добавление CaF₂ производится в следующих случаях:

- Сырьевой источник оксидов железа имеет низкую склонность к когезии;

- Железная руда имеет высокое содержание примесей или используется низкокачественный уголь;

- Используется относительно большое количество вспомогательных материалов для получения необходимой основности с высоким содержанием SiO₂;

- при высоком содержании серы в компонентах окатышей.

Количество CaF₂ может составлять 0,2...2,5 % от общей массы окатышей.

В результате лабораторных испытаний были определены рекомендуемые характеристики железорудного сырья [6].

Химический состав:

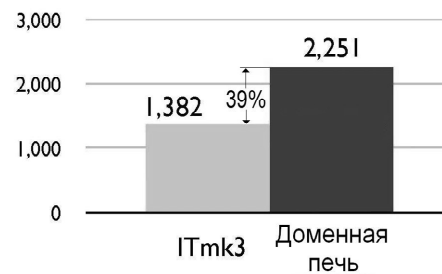
Содержание, %				
Fe общее	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P	S
>60	<1	<4,5	<0,05	<0,15

Гранулометрический состав: содержание фракции «-» 44 мкм > 70%; или величина удельной поверхности частиц (Индекс Блейна - ИВ) ИВ>1200 см²/г.

Определены также гарантируемые показатели готовой продукции (гранулированный чугун):

Fe, %	C, %	Si, %	P, %	S, %	Размер, мм
>96	2,0...4,0	0,2	0,05	0,04...0,10	3,35...25

Эмиссия двуокиси углерода (CO₂), кг/т



Эмиссия других газообразных веществ, кг/т

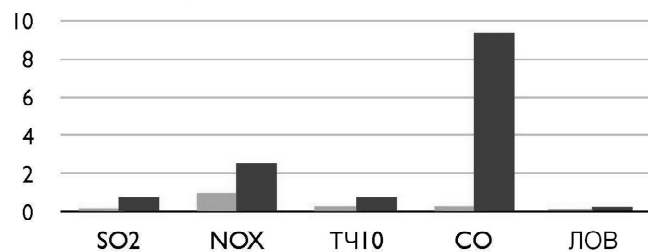


Рис. 7. Сравнение эмиссии CO₂ и других вредных веществ завода ITmk3 и электродуговой печи с доменной печью и кислородным конвертером

В результате лабораторных испытаний получены данные, позволяющие оценить влияние технологии ITmk3 на экологию [8].

На рис.7 представлено сравнение эмиссии CO₂ и количества других газообразных выбросов завода ITmk3 с доменной печью.

В проектах промышленных заводов ITmk3 для получения гранулированного чугуна из окатышей используются кольцевые печи с вращающимся подом. На рис.8 представлена упрощенная схема такой печи с основными реакциями и режимами [4, 5, 9, 10, 11, 12].

Результаты лабораторных испытаний явились основой для определения материального и газового балансов, выбора технологического оборудования и основных технических и экономических характеристик коммерческого завода ITmk3.

Первый коммерческий завод ITmk3 Mesabi Nuggets производительностью 500 тысяч тонн гранулированного чугуна в год был введен в эксплуатацию в январе 2010 г в штате Миннесота, США [13, 14].

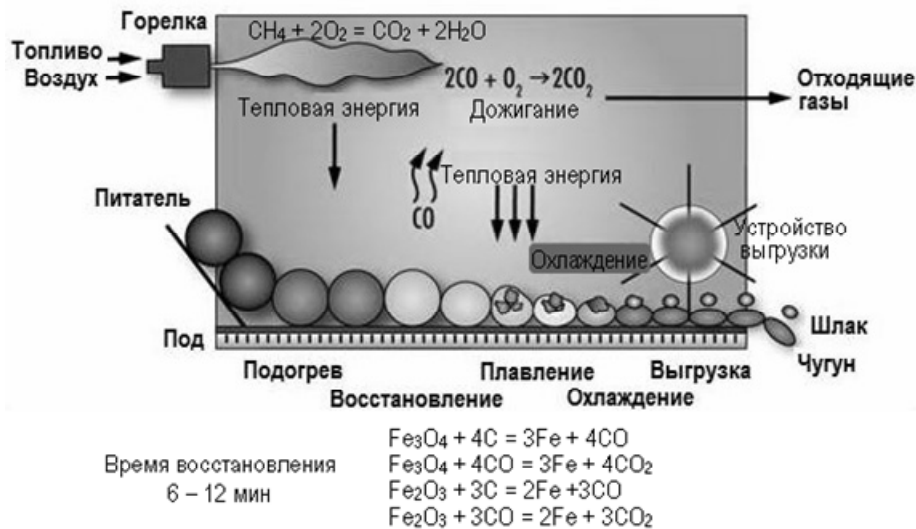


Рис. 8. Упрощенная схема печи с вращающимся подом

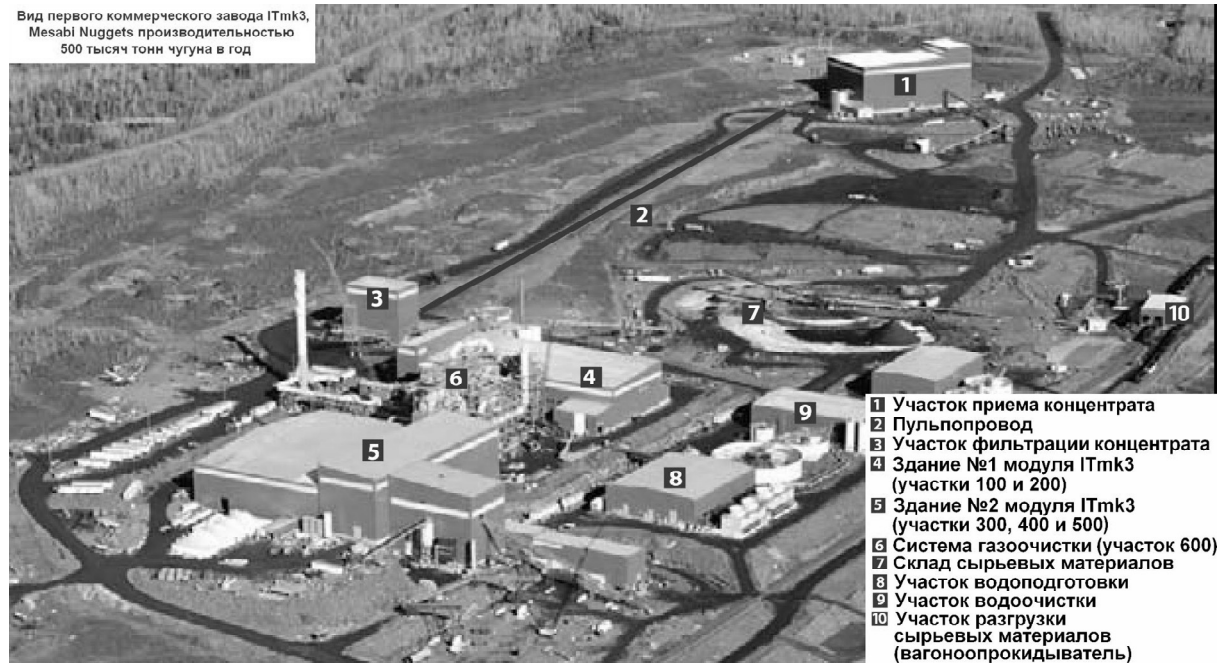


Рис. 9. Вид первого коммерческого завода ITmk3 Mesabi Nuggets

На рис.10 представлена технологическая схема завода ITmk3 Mesabi Nuggets. Схема была разработана фирмой Midrex с учетом испытаний, выполненных в лаборатории Nishin, испытаний лабораторной установки ITmk3 производительностью 3000 т в год на заводе Kakogawa Kobe Steel Ltd, а также испытаний опытно-демонстрационного завода ITmk3 производительностью 25000 т в год. В первом квартале 2011 г завод должен выйти на проектную производительность.

Проект второго коммерческого завода ITmk3 выполнен фирмой Hares Engineering для компании SBS Steel, г.Актобэ, Казахстан. Проект завода SBS Steel отличается от проекта завода ITmk3 Mesabi Nuggets более полной утилизацией тепловой энергии отходящих газов и системой очистки отходящих газов. Если в проекте завода ITmk3 Mesabi Nuggets энергия отходящих газов используется только для нагрева воздуха горения, то в проекте завода SBS Steel она дополнительно используется для генерирования электроэнергии, которой будет вырабатываться достаточно для обеспечения электроснабжения всего завода. Для очистки отходящих газов в проекте завода SBS Steel применены рукавные фильтры, в то время как на заводе ITmk3 Mesabi Nuggets используются влажные скрубберы.

Испытания в лаборатории Nishin показали, что такая же технологическая схема может быть использована для переработки титано-магнетитовых руд. При этом практически весь титан попадает в шлак.

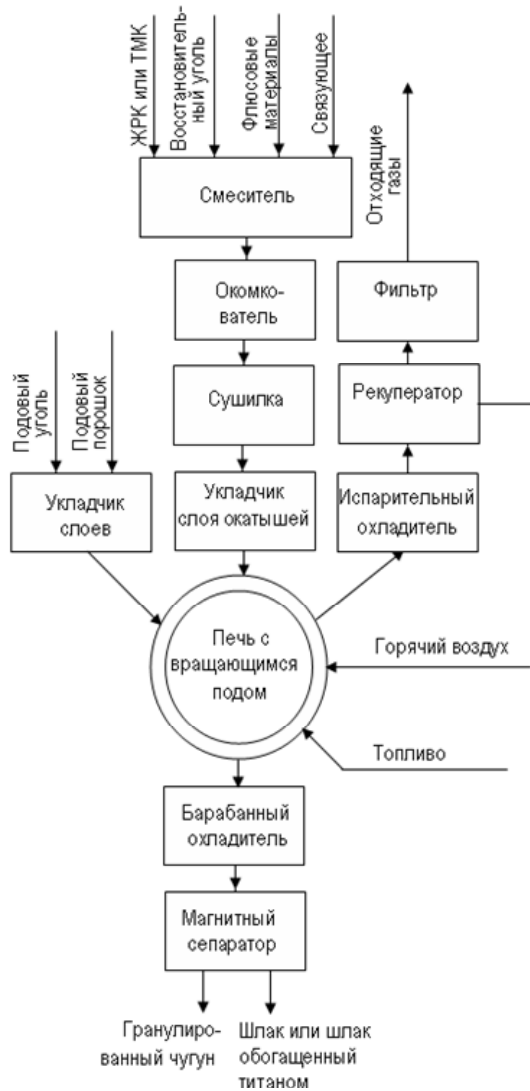


Рис. 10. Технологическая схема первого коммерческого завода ITmk3 Mesabi Nuggets

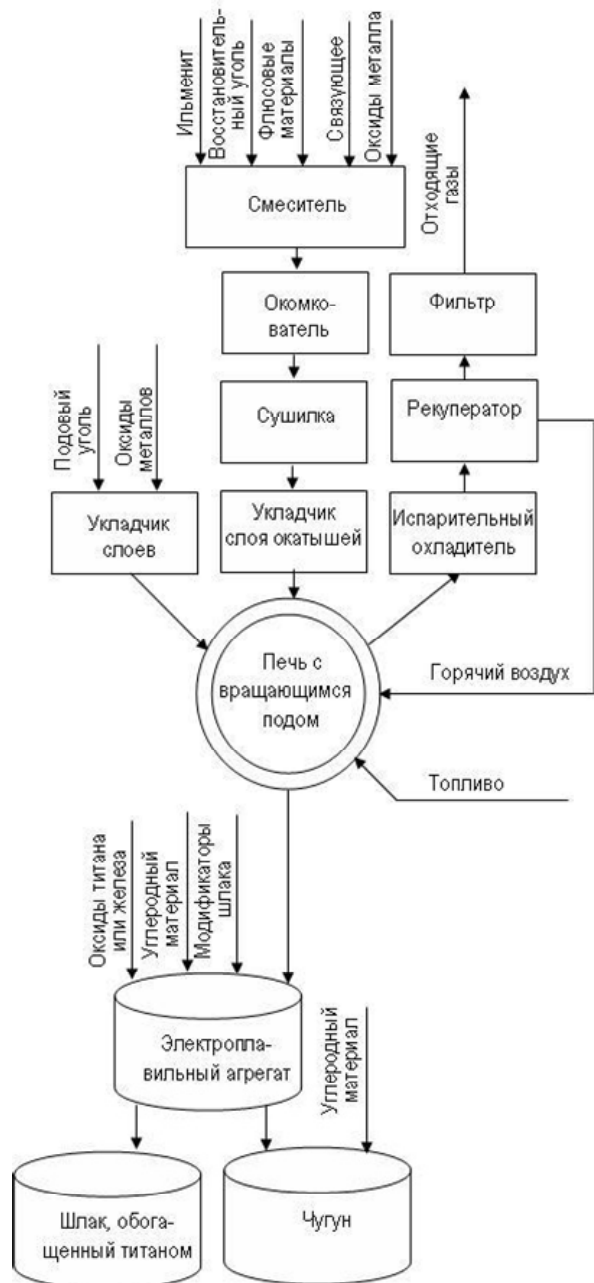


Рис. 11. Технологическая схема завода для производства обогащенных оксидов титана и чугуна из ильменита

В отличие от железных и титаномагнетитовых руд применение печи с вращающимся подом для переработки ильменитовых руд в настоящее время не вышли за пределы лабораторных и теоретических исследований [15]. Нам представляется перспективной технологическая схема, предложенная в работе [16], и представленная на рис. 11.

Выводы

В результате испытаний, выполненных Hares Engineering и Kobe Steel в лаборатории Nishin, показано, что все железорудные концентраты, производимые в странах СНГ, в том числе из окисленных руд, могут эффективно использоваться в технологии прямого восстановления ITmk3.

Определены рекомендуемые характеристики железорудного сырья, при которых процесс ITmk3 экономически целесообразен: общее содержание Fe более 60%, индекс Блейна более 1200.

Технология ITmk3 не требует применения коксующегося угля.

Потребление природного газа в технология ITmk3 значительно ниже, чем в технологии прямого восстановления Midrex.

Применение технологии ITmk3 обеспечивает существенное снижение выброса вредных веществ и парниковых газов в атмосферу по сравнению с доменным процессом.

Лабораторные испытания титано – магнетитовых руд показали, что при реализации процесса ITmk3 практически весь титан попадает в шлак.

Промышленные испытания гранулированного чугуна, полученного на заводе ITmk3 Mesabi, при использовании его в составе шихты (до 20%) для загрузки в электропечи вместо чушкового чугуна показали, что удаётся сократить время плавки на 2...3 мин и энергозатраты до 5%, а производительность печи увеличить на 5%.

Благодаря превосходным плавильным характеристикам, физическому размеру, чистоте и стабильному химическому составу использование гранулированного чугуна позволяет лучше контролировать процесс плавления стали и получать высококачественную сталь с заданными характеристиками.

Дальнейшее развитие технологий прямого восстановления оксидов металлов с применением печей с вращающимся подом предполагается для переработки ильменитовых руд.

Список литературы

1. Люнген Х.-Б., Кноп К., Стеффен Р, Современное состояние процессов прямого и жидкофазного восстановления железа, Черные металлы, февраль 2007.
2. Takuya Negami. ITmk3 - Premium Ironmaking process for the new Millenium/Direct from MIDREX, March 2001 (2001-03), pp. 7- 9.
3. Y. Gordon and J. Els from Hatch Canada and Hatch Australia, "ITmk3 technology and its application for mining and steel industry in Ukraine and Russia", International Conference on Ironmaking Technology, March 21, 2007, Kyiv.
4. H. Tanaka, K. Miyagawa, and T. Harada, "FASTMET[®], FASTMELT[®], and ITmk3: Development of New Coal-based Ironmaking Processes," Direct from Midrex From the Hearth, Winter 2007/2008, pp. 8-13.
5. J.M. McClelland, "A Layman's Guide to the Midrex and Kobe Steel Rotary Hearth Furnace Technologies," Direct from Midrex From the Hearth, Winter 2007/2008, pp. 4-7.
6. Isao Kobayashi, Kobe Steel, "Development of ITmk3[®] Process and Iron Ore", Conference of ITmk3 family, April 3, 2009 Kyiv.
7. Razaz Younes, Managing Director of Hares Engineering, Igor Opryshko, Deputy Director (R&D) of Hares Engineering, Ph.D., New iron nuggets production process (ITmk3) for electric steelmaking production, Друга Міжнародна науково-технічна конференція УкрФА «Ключові проблеми розвитку електрометалургійної галузі», 23-24 квітня 2009 р, Київ.
8. Yasuhiro Tanigaki and Isao Kobayashi, "New Ironmaking Technology and Environmental Contribution", ICSS, p. 55, Osaka Japan, June 2000.
9. Isao Kobayashi, Yasuhiro Tanigaki and Akira Uragami. A new process to produce iron directly from fine ore and coal/ Engineering Company, Kobe Steel, Ltd, Osaka, Japan/ Iron and Steelmaker, Vol. 28, No. 9, 2001, pp 19-22.
10. H. Ishikawa, j. Kopfle, j. Mcclelland, j. Ripke. Rotary Hearth Furnace technologies for iron ore and recycling applications /Archives of metallurgy and materials, Volume 53, Issue 2, 2008, pp. 541-545.
11. Yasuhiro TANIGAKI, Isao KOBAYASHI, Shuzo ITO and Yukio AKAZAWA, "Direct Reduced Iron Production Processing", KOBELCO TECHNOLOGY REVIEW, 23(2000) Apr, p. 3.
12. Harada Takao, Tsuge Osamu, Kobayashi Isao, Tanaka Hidetoshi, Uemura Hiroshi. The development of new Iron making processes/Journal Kobelco Technol Rev., Vol. No. 26, pp. 92-97, 2005.
13. Mesabi Nugget 'Good to go', Dynamics Details, A publication for employees and friends of Steel Dynamics, Inc, issue 22, www.steeldynamics.com
14. Mesabi Nugget, World's First Commercial ITmk3 Plant, Presented at AISTech 2009 – The Iron & Steel Technology Conference and Exposition, St. Louis, May 4-7, 2009
15. "Fundamentals of metallurgy", edited by Seshadri Seetharaman, Woodhead Publishing and Maney Publishing on behalf of The Institute of Materials, Minerals & Mining CRC Press, Boca, Raton, Boston, New York, Washington, DC, WOODHEAD PUBLISHING LIMITED, Cambridge England (first published 2005), 589 pages.
16. Glenn E. Goffman, Lancaster, SC (US); Ronald D. Grey, Bethel Park (US), Method for producing beneficiated titanium oxides, Patent No. US 6,685,761 B1, Dated Feb.3, 2004