

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Сибирский государственный индустриальный университет**

Посвящается 400-летию города Новокузнецка

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО
«Металлургия – 2017»**

15 – 16 ноября 2017 г.

*Труды
XX Международной научно-практической конференции
Часть 1*

**Новокузнецк
2017**

УДК 669(06)+658.012.056(06)
М 540

Редакционная коллегия

академик РАН Л.А. Смирнов, д.т.н., профессор Е.В. Протопопов,
д.т.н., профессор М.В. Темлянец, д.т.н., профессор А.В. Феокистов,
д.т.н., профессор Г.В. Галевский, д.ф.-м.н., профессор В.Е. Громов,
д.т.н., профессор А.Р. Фастыковский, д.т.н., профессор Н.А. Козырев,
к.т.н., профессор С.Г. Коротков, к.т.н., доцент С.В. Фейлер

М 540 Металлургия: технологии, инновации, качество : труды XX Международной научно-практической конференции: в 2-х ч. Ч. 1 / под ред. Е.В. Протопопова; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2017. – 460 с., ил.

ISSN 2542-1670

Труды конференции включают доклады по актуальным вопросам теории и технологии производства, обработки и сварки металлов, энергоресурсосбережения, рециклинга и экологии в металлургии.

Конференция проведена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 17-08-20433.

ОРГАНИЗАТОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Администрация Кемеровской области
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»
АО «ЕВРАЗ ЗСМК»
АО «Русал Новокузнецк»
АО «Кузнецкие ферросплавы»
ОАО «Черметинформация»
Издательство Сибирского отделения РАН
Журнал «Известия вузов. Черная металлургия»
Журнал «Вестник СибГИУ»
Журнал «IOP conference series: materials science and engineering»
ОАО «Кузбасский технопарк»
Западно – Сибирское отделение Российской Академии естественных наук
Совет молодых ученых Кузбасса

ISSN 2542-1670

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2017

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ РАСПЛАВОВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШЛАКА	104
Журавлев А.А. ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ПЕРЕРАБОТКИ МОЛИБДЕНОВЫХ РУД	107
Полях О.А., Журавлев А.Д. ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЛАВКИ НА СТЕПЕНЬ УДАЛЕНИЯ ФОСФОРА	111
Настюшкина А.В., Шевченко Е.А., Шевченко А.А. К ВОПРОСУ О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ СТАЛИ КОНВЕРТЕРНЫМ ВАНАДИЕВЫМ ШЛАКОМ	114
Рыбенко И.А., Голодова М.А., Нохрина О.И., Рожихина И.Д. ПОИСК ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИЙ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ «ИККИЖЕЛОН» (РЕСПУБЛИКА ТАДЖИКИСТАН)	118
Рахманов О.Б., Аксенов А.В., Немчинова Н.В., Солихов М.М., Черношвец Е.А. ВЕДЕНИЕ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАВКИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА	123
Ёлкин К.С., Ёлкин Д.К., Карлина А.И. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ В УСЛОВИЯХ ОБНОВЛЕНИЯ ЦЕННОСТЕЙ МОЛОДЕЖИ	127
Власов А.А., Бажин В.Ю., Копцев А.Е. ПРЯМОЕ ПОЛУЧЕНИЕ ЖЕЛЕЗА: СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ТЕНДЕНЦИИ	130
Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Ходосов И.Е.	
СЕКЦИЯ 2: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ: ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО, ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ, ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА	135
ИССЛЕДОВАНИЕ УГАРА РЕССОРНО-ПРУЖИННОЙ СТАЛИ МАРКИ 40С2 ПРИ НАГРЕВЕ ПОД ПРОКАТКУ И ОСОБЕННОСТЕЙ СТРОЕНИЯ, ХИМИЧЕСКОГО И ФАЗОВОГО СОСТАВА ЕЕ ОКАЛИНЫ	135
Темляниев М.В., Коноз К.С., Кузнецова О.В., Деев В.Б., Живаго Э.Я. ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ 100-М ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО ЗАКАЛЕННЫХ РЕЛЬСОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ	140
Юрьев А.А., Громов В.Е., Морозов К.В., Иванов Ю.Ф., Коновалов С.В., Семин А.П. РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА АВТОЛИСТА ПОВЫШЕННОГО КАЧЕСТВА В УСЛОВИЯХ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ 2500	144
Кондрашов С.А., Голубчик Э.М., Мартынова Т.Ю. МИКРОСТРУКТУРА И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ ХАРДОКС 450, МОДИФИЦИРОВАННОЙ НАПЛАВКОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ Fe-C-Cr-Nb-W И ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ	151
Громов В.Е., Кормышев В.Е., Глезер А.М., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Семин А.П. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ В СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ	155
Нго Као Кыонг, С.А. Зайдес	155
ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ДЕФОРМИРОВАННОЙ ПРОВОЛОКИ	159
Сычков А.Б., Столяров А.Ю., Камалова Г.Я. Ефимова Ю.Ю., Егорова Л.Ю., Гулин А.Е. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИМ ТЕХНОЛОГИЯМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	165
Деев В.Б., Приходько О.Г., Пономарева К.В., Куценко А.И., Сметанюк С.В. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО ПРЕССОВАНИЯ СПОСОБОМ “КОНФОРМ”	169
Фастыковский А.Р., Селиванова Е.В., Федоров А.А. ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ПОРИСТЫХ СТРУКТУР	172
Куницина Н.Г., Ташметова М.О. ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕГАТИВНЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ ТОНКИХ ШИРОКИХ СТАЛЬНЫХ ПОЛОС	176
Кожевникова И.А., Кожевников А.В. АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРОКАТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	180
Фастыковский А.Р.	

ПРЯМОЕ ПОЛУЧЕНИЕ ЖЕЛЕЗА: СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ТЕНДЕНЦИИ

Нохрина О.И.¹, Рожихина И.Д.¹, Ходосов И.Е.²¹Сибирский государственный индустриальный университет,

г. Новокузнецк, Россия

²АО «НПО «Аконит»,

г. Новокузнецк, Россия, khodosov@mail.ru.

Аннотация. Описаны действующие технологии получения железосодержащих материалов без использования кокса и доменного передела. Приведено краткое описание промышленно-освоенных технологий прямого получения железа. Обозначены возможные тенденции развития технологий прямого получения железа.

Ключевые слова: внедоменная металлургия, бескоксая металлургия, железо прямого восстановления, DRI, металлизация, технологии металлизации.

DIRECT REDUCTION OF IRON: CURRENT STATUS, TRENDS.

Nokhrina O.I.¹, Rozhihina I.D.¹, Hodosov I.E.²¹Siberian state industrial university, Novokuznetsk, Russia,²PLC «NPO «Akonit», Novokuznetsk, Russia

Annotation. The technology of obtaining iron-containing materials without the use of coke and blast furnace is shown. Modern technologies of direct iron production are shown. The trends in the development of direct iron production technologies are determined.

Keywords: nedomina metallurgy, non coking metallurgy, direct reduction iron, DRI, metallization, metallization technology.

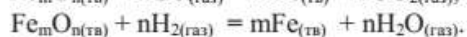
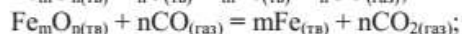
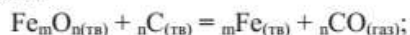
Получение первичного металла осуществляется при протекании реакции восстановления железа из оксидсодержащего материала. В настоящее время главным агрегатом для восстановления железа является доменная печь. Технология доменной плавки развивается на протяжении 600 лет и, по мнению ряда ученых металлургов, достигла предела эффективности [1]. Наиболее явными недостатками доменного передела является высокая энергоемкость процессов, необходимость в производстве агломерата, использование дорогостоящего металлургического кокса а также высокие выбросы углекислого газа в атмосферу. При этом развитие теории и практики восстановительных процессов, поиск новых способов получения металла, привели к созданию технологий, позволяющих получать качественные железосодержащие материалы без использования кокса и доменной печи. Такие технологии получили названия: технологии прямого получения железа, внедоменной или бескоксовой металлургии [2].

Основные отличия между доменным и бескоксвыми способами получения железа представлены в таблице:

Признак отличия:	Доменное производство	Внедоменное производство
Температуры процессов, °С	~ 1550	~ 1200
Подготовка сырья	Производство агломерата	Производство окатышей или брикетов
Агрегатное оформление	Доменная печь	Трубчатая печь, Шахтная печь, Печь с подвижным подом
Восстановитель	Кокс, ПУТ (пылеугольное топливо)	Природный газ, Синтетический газ, Уголь

Восстановительные процессы, протекающие в доменной печи, и при внедоменном получении железа протекают согласно общим термодинамическим законам. То есть восстановление железа из образуемых им стабильных оксидов (Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , FeO) осуществляется с участием твердого углерода, источником которого в доменной печи является кокс, а также с участием газов – CO , H_2 согласно

реакциям:



Примечание: реакции представлены в общем виде, для температур выше 570 °С.

Реакции, протекающие в твердой фазе, то есть реакции твердофазного восстановления железа из оксидов, легли в основу большинства технологий прямого получения железа.

Далее по тексту данные процессы будут названы «процессами металлзации», а получаемые материалы – «металлизированными материалами».

На протяжении прошлого столетия было предложено и опробовано более 130 способов внедоменного получения железа [3]. Общим для большинства процессов, является то, что исходные и получаемые материалы находятся в твердом состоянии, а температуры процессов не превышают температур их размягчения. Качество получаемых материалов принято оценивать содержанием в материале металлического железа, углерода, вредных примесей и степени металлзации, которая показывает отношение содержания металлического железа к общему [4].

Развитие процессов металлзации привело к созданию и промышленному внедрению таких технологий как SL/RN, Midrex, HyLIII, Corex, Fastmet, ITmk3 и др. Полученные по данным технологиям металлзированные материалы нашли свое применение в качестве шихты при выплавке электростали.

Технология металлзации Midrex® Process (рисунок 1) получила наиболее широкое распространение в промышленности. В настоящее время по данной технологии осуществляется производство 70 % от общего объема произведенного металллизованного сырья в мире. В качестве агрегата металлзации используется вертикальная шахтная печь. Согласно данной технологии окомкаваемая железная руда в виде окатышей подается в печь и при непосредственном контакте с восстановительным газом, пускаемом противотоком, самотеком опускается на дно печи. Температура процесс не превышает 900 °С, что необходимо для предотвращения образования настывей на футеровке печи. В качестве восстановителя используется смесь природного и оборотного газов, которая для получения CO и H₂ пропускается через каталитические трубы [5].

Компанией Midrex Technologies, Inc. предложена технология - MXCOL®Technology, позволяющая получать необходимый газ путем газификации угля.

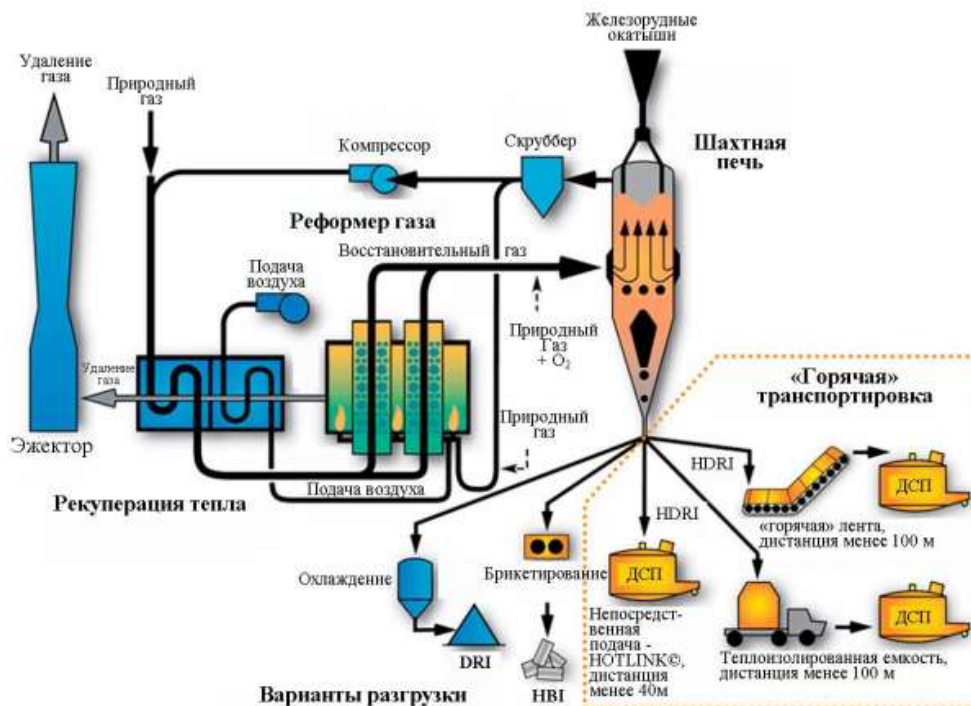


Рисунок 1 - Схема технологического процесса Midrex Process (источник: Midrex Technologies, Inc. [5]; перевод автора)

В результате процесса образуются металлзированные окатыши с губчатой структурой (международное обозначение – DRI). Полученные окатыши могут быть направлены для горячего брикетирования с получением горячего брикетированного DRI (международное обозначение – HBI). Получение

HBI позволяет осуществлять безопасное хранение и транспортировку материалов.

В России компанией «Металлоинвест» (АО «ОЭМК») в 2016 году по технологии Midrex произведено 5,7 млн. т металлизованных окатышей. Согласно планам предприятия планируется запуск производства HDR мощностью 1,8 млн. т. в год на площадке Лебединского горно-обогатительного комбината (ЛГОК) в г. Губкин [6].

Еще одной широко распространенной технологией металлизации является технология HYL III © Process. В настоящее время по данной технологии производится до 15 % всего металлизованного сырья в мире. Данная технология реализуется в шахтной печи оборудованной пересыпным устройством. Процессы восстановления протекают при температурах - 1000 °С и избыточном давлении, которое может достигать 6 атм. Согласно технологии HYL III получение восстановительного газа осуществляется путем паровой конверсии природного газа и отходящих газов отобранных с верхних горизонтов шахтной печи.

Металлизированное сырье, полученное по описанным выше технологиям, имеет стабильно высокий спрос у предприятий, выплавляющих высококачественные электростали. Это связано с тем, что металлизованные материалы не содержат примесей цветных металлов, которые в свою очередь снижают качество стали и требуют дополнительных приемов их удаления. Металлизированные материалы характеризуются также стабильным химическим составом и техническими характеристиками, что в свою очередь положительно влияет на ход плавки в целом. Особый интерес представляет возможность подачи горячих окатышей - HDRI непосредственно в ДСП, то есть до момента их охлаждения. Данный прием позволяет значительно увеличить технико-экономические показатели за счет снижения затрат тепла на расплавление материала. Таким образом, металлизованные материалы являются прямой альтернативой металлическому лому при выплавке сталей в ДСП. Общим недостатком для данного сырья является то, что в материале остается пустая порода и в случае использования угля зольный - остаток восстановителя. Данный факт ограничивает использование бедных железных руд и железосодержащих отходов производств [7].

Широко известным способом металлизации является технология SL/RN (Stelco-Lurgi Steel-National Lead), которая основана на использовании вращающейся печи (по типу обжиговой). В качестве сырья применяется окомкованная смесь железной руды и угля, также возможна подача угля непосредственно в печь. Процесс металлизации протекает при температурах 1000 – 1200 °С, за счет чего возможно достижение достаточно высокой степени металлизации (~ 98 %) при использовании небогатых железных руд. Преимуществом данной технологии является технологическая простота и возможность использования разных твердых углеродистых восстановителей, в том числе низкосортных. В качестве топлива для горелок также могут быть использованы оборотный и синтетический газы. Существуют примеры использования горячих отходящих газов для выработки электроэнергии (рисунок 2).

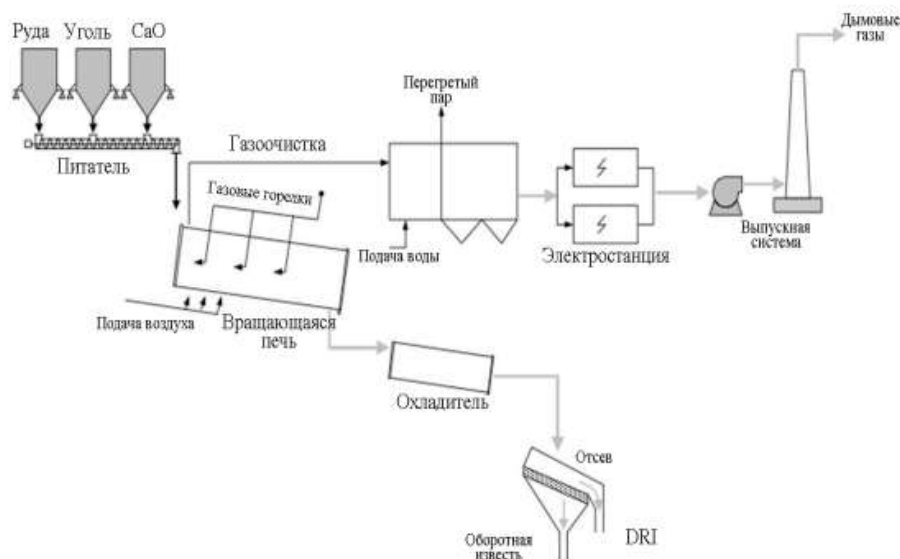


Рисунок 2 – Схема технологического процесса SL/RN (источник: IETD [7]; перевод автора)

Следует отметить, что в России на заводе «Сибэллектросталь» была разработана и освоена технология металлизации, в которой в качестве восстановителя буроугольный полукокс. Металлиза-

ция осуществлялась на комплексной установке «решетка-трубчатая печь». Металлизированные окатыши поступали на плавку в электропечь в горячем состоянии при температурах 800 - 1000 °С. Такое решение показало увеличение производительности ДСП в 1,5 раза по сравнению с работой на холодных обожженных окатышах [8].

Дальнейшее развитие технологий металлизации привело к созданию около 20 способов получения металла в виде расплава или гранул в специальных металлургических агрегатах. С начала 90х годов прошлого столетия промышленное освоение получил процесс Corex (рисунок 3), согласно которому в сопряженных агрегатах первоначально получают твердый металлизированный материал, который далее направляется в плавильный газификатор. В плавильный газификатор через купольную часть загружается уголь. В среднюю по высоте зону газификатора дувается кислород, который способствует образованию в слое угля оживленного (псевдооживленного) слоя и горячих восстановительных газов. В результате на дне плавильного газификатора образуются жидкие чугун и шлак. Таким образом, процесс Corex стал первым крупномасштабным процессом бескоксового получения железа, альтернативным доменному.

Исследования процессов металлизации, проведенные фирмами Kobe Steel Ltd. и Midrex Technologies, Inc. привели к созданию технологии Fastmet®. Данная технология реализуется с помощью печи с вращающимся подом (международное обозначение - RHF), на выходе получается DRI. В настоящее время эта технология нашла свое применение при металлизации отходов сталеплавильного производства. В качестве твердого углеродистого компонента шихты используется уголь, древесный уголь, кокс. Железосодержащие материалы и восстановитель в виде окатышей или брикетов подают в RHF таким образом, чтобы на поверхности подвижного пода образовался слой от 2 до 5 см. Металлизацию осуществляют при температуре 1350 °С в течение 6 – 12 мин. Такие режимы металлизации позволяют получать металлизированные материалы со степенью металлизации 95 – 98 %. Образующиеся горячие газы, содержащие значительное количество CO, повторно направляют в печь с помощью горелок, расположенных по контуру печи. В последующем данная технология была дополнена плавильной установкой по типу ДСП. Данный процесс получил название astmelt. По данной технологии возможно получение чистых по примесям цветных металлов и серы сортовых сталей [9].

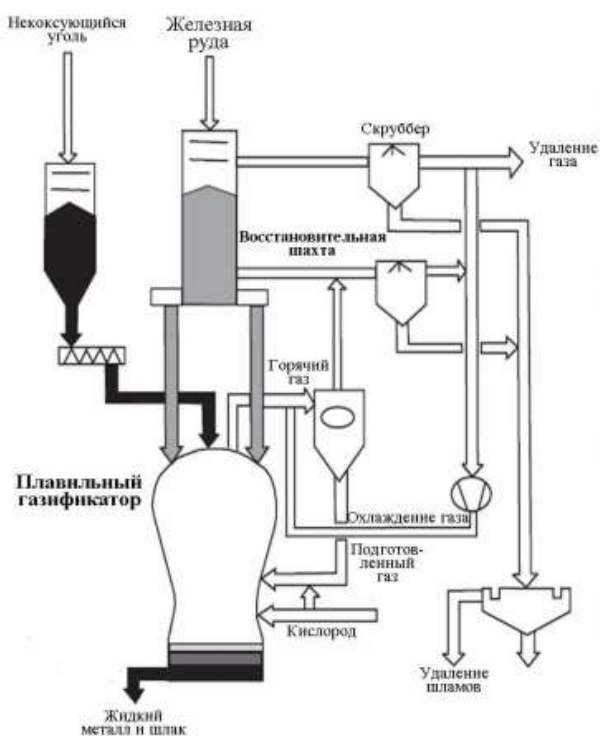


Рисунок 3 - Схема технологического процесса Corex

Развитие данной технологии привело к созданию процесса ITmk3 - «производство передельного чугуна высшего качества» (рисунок 4). Данная технология также основана на использовании RHF. Отличие состоит в том, что в процессе металлизации осуществляется расплавление материалов, которое приводит к образованию гранулированного чугуна. Процессы осуществляются при температурах 1350 -1450 °С [10].

Применение кольцевых печей для получения металлизированных материалов позволяет эффективно использовать тепло отходящих газов и более точно контролировать температуру материалов по ходу их перемещения в пространстве печи. Печь с подвижным подом также позволяет нагревать материалы до высоких температур (1400 – 1500 °С) в течение небольшого времени (5 - 15 мин.), что делает возможным управление процессами разделения металлической и шлаковой фаз при получении гранулированного чугуна [10].

Выводы. Технологии металлизации в течении последнего полувека стали прогрессивным направлением в черной металлургии. Анализ технологий металлизации, получивших промышленное освоение, позволяет обозначить вероятные направления развития технологий внедоменного получения железа:

- совмещение процессов металлизации и переплава металлизированных материалов в ДСП с получением товарной продукции;
- использование альтернативных источников тепла и восстановительных газов, в том числе полученных путем газификации не дефицитных твердых углеродистых материалов;
- усовершенствование аппаратного обеспечения процессов;
- использование бедных железных руд, железо- и углеродсодержащих техногенных отходов;
- улучшение технико-экономических показателей существующих способов производства гранулированного чугуна.

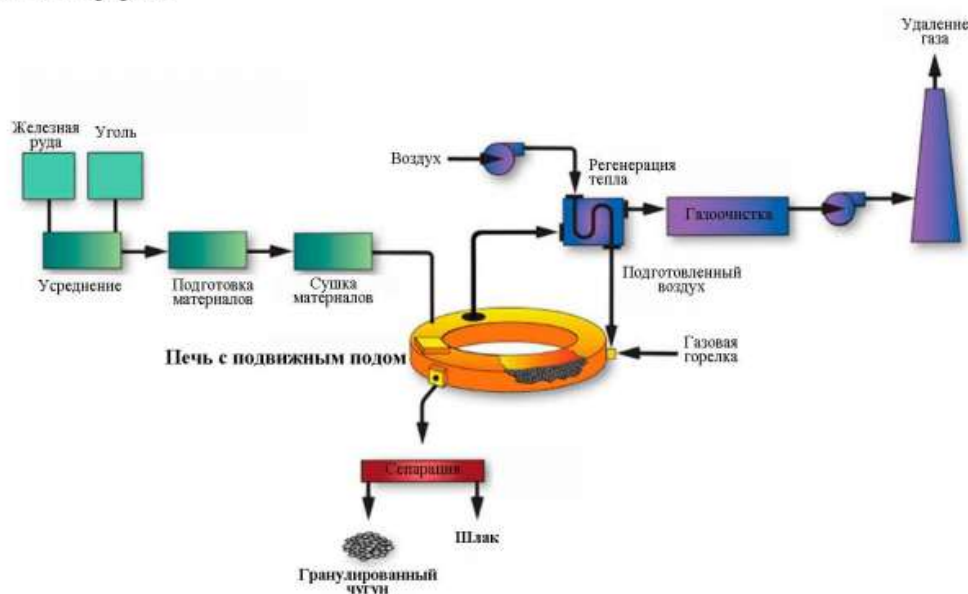


Рисунок 4 - Схема технологического процесса ITmk3 (источник: 10; перевод автора)

Библиографический список

1. Товаровский, И. Г. Доменная плавка – эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы / И. Г. Товаровский – Днепропетровск : Пороги, 2003. – 597 с
2. Energy-efficient reduction of iron from its ores / Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Rybenko I.A., Khodosov I.E. // Steel in Translation. Vol. 46. № 4. – 2016. С 237 – 244.
3. Курунов, И. Ф. Доменный процесс – есть ли альтернатива? / И. Ф. Курунов // Металлург. – 2012. – № 4. – С. 40 – 44.
4. Юсфин Ю. С. Металлургия железа / Ю. С. Юсфин, Н. Ф. Пашков // Учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению Металлургия. Москва, 2007. – 320 с.
5. Research & Development Department, Iron Unit Division, Natural Resources & Engineering Business, Midrex Technologies, Inc [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.midrex.com.
6. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.metalloinvest.com/>
7. Organisation for Economic Co-operation and Development. Energy technology transitions for industry: strategies for the next industrial revolution. – OECD Publishing, 2009.
8. Тулин Н. А. и др. Развитие бескоксовой металлургии. – 1987.
9. Ziebig A., Lampert K., Szega M. Energy analysis of a blast-furnace system operating with the Corex process and CO₂ removal //Energy. – 2008. – Т. 33. – №. 2. – С. 199-205.
10. Kikuchi S. et al. ITmk3 process //Kobelco technology review. – 2010. – Т. 29. – С. 77-84.

Научное издание

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО**
«Металлургия – 2017»

Труды XX Международной научно-практической конференции

Часть 1

Под общей редакцией профессора Е.В. Протопопова

Технический редактор	В.Е. Хомичева
Компьютерная верстка	Н.В. Ознобихина

Подписано в печать 23.10.2017 г.
Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага офисная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 27,0 Уч.-изд. л. 29,4 Тираж 300 экз. Заказ № 521

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.
Издательский центр СибГИУ