



## ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОЦЕССАХ ПОЛУЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗА ИЗ РУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**В. А. Шаповалов, Г. А. Мельник, Д. М. Жиров, А. А. Ждановский,  
К. А. Цыкуленко, М. С. Приходько**

Даны краткие характеристики доменного и альтернативных способов получения металла из железосодержащих материалов. Показано, что применение плазменных технологий позволяет существенно сократить расход кокса в доменной печи, а также дает возможность осуществления процессов в шахтных печах без коксовой насадки при использовании плазмотронов. Описаны основные способы жидкофазного восстановления. Оценены возможности применения плазменных технологий для прямого восстановления железа. Предложена схема плазменной переработки железорудного сырья.

Brief characteristics of blast furnace and other methods of producing metal from iron-containing materials are given. It is shown that application of plasma makes it possible to decrease significantly the consumption of coke in the blast furnace, and gives also feasibility to realize processes in shaft furnaces without a coke nozzle in use of plasmatrons. Main methods of liquid-phase reduction are described. The feasibilities of application of plasma technologies for a direct iron reduction are evaluated. Scheme of plasma recycling of iron-ore material is offered.

**Ключевые слова:** доменная печь; кокс; плазменные технологии; бескоксковая металлургия; жидкофазное восстановление

Около 94 % первичных черных металлов производят двухстадийным способом, включающим выплавку чугуна в доменных печах и его переработку в сталеплавильных агрегатах [1]. Домна за свою уже более шестисотлетнюю историю превратилась во многих отношениях в весьма совершенный агрегат, и ее позиции в черной металлургии незыблемы.

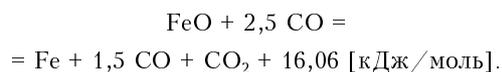
Несмотря на достоинства, у домны есть и некоторые недостатки, главный из которых — необходимость использования дорогого и дефицитного кокса, производство которого является высокотоксичным. Проводится множество исследований с целью разработки оптимальных технологических режимов для экономии этого материала. Следует отметить, что при уменьшении количества кокса в составе шихты увеличивается доля железосодержащих материалов, что приводит к повышению производительности домны.

Кокс в доменной печи служит не только топливом и восстановителем оксидов руд, но и разрыхлителем, обеспечивающим необходимую газопроницаемость столба шихтовых материалов. При загрузке шихты в доменной печи чередуют слои кокса и железорудных материалов с флюсом. Слоистая структура столба шихты сохраняется в печи вплоть

до зоны плавления. Пористость кокса составляет 49...53 %, а размеры основной (более 40 %) фракции колеблются в пределах 40...60 мм [2, 3].

В доменной печи протекают процессы прямого и косвенного восстановления оксидов железа, причем до температуры 800 °С — лишь косвенный с участием CO. Выше этой температуры зафиксировано прямое восстановление посредством твердого углерода, расходуемого не на непосредственное взаимодействие с оксидами, а на регенерацию им в газовой фазе из диоксида углерода его монооксида, восстанавливающего оксиды. Выше 1200 °С происходит только прямое восстановление.

Расход углерода на слабую экзотермическую реакцию косвенного восстановления монооксида железа подсчитывается по уравнению

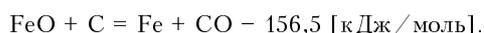


В коэффициентах 2,5 и 1,5 выражается предельное использование восстановительной способности газа, поскольку при 700 °С только 40 % CO может превратиться в CO<sub>2</sub>. При этом расход углерода для восстановления 1 т железа составляет 536 кг. В действительности используется еще меньшее количество CO.

Реакция прямого восстановления, требующая больших затрат тепла, является очень экономичной



с точки зрения расхода углерода, так как обеспечивает практически полное его использование:



Здесь затраты углерода на 1 т железа составляют 214 кг, однако с увеличением степени прямого восстановления увеличивается расход углерода как топлива.

Одновременное оптимальное удовлетворение потребностей в углероде как топливе и восстановителе без его перерасхода теоретически составляет около 300 кг на 1 т железа при показателе прямого восстановления 0,25... 0,30. Однако большинство действующих доменных печей еще далеки от достижения такого показателя [3].

Основным путем снижения удельного расхода кокса в доменном производстве является замена части кокса менее дефицитными и дорогостоящими топливными добавками, вдуваемыми в горн печей: мазутом, природным газом и угольной пылью, особенно при повышении температуры дутья [4].

Следует отметить работы по применению пылеугольного топлива и других добавок в дутье, проводимые в Украине. Так, в работе [5] показана возможность создания технологии, позволяющей заменить пылеугольным топливом до 40... 50 % кокса и сократить его расход на 1 т чугуна до 200 кг, уменьшить общий расход топлива при производстве чугуна в единицах условного топлива на 10... 20 % базового уровня.

Фирма «Хоговенс» на домне 6 повысила расход вдуваемого угля до 212 кг на 1 т чугуна, что позволило снизить расход кокса до 272 кг на 1 т чугуна [6]. Эксперименты, проведенные в США и других странах, позволили определить оптимальное соотношение расхода различных топлив для устойчивого хода доменной плавки при низком расходе кокса. Эта смесь включает в расчете на 1 т чугуна следующие компоненты, кг: 230 кокса, 40 коксового орешка (10... 25 мм), 180 пылеугольного топлива и 50 природного газа. Такой расход кокса близок к минимально допустимому по условиям дренажа первичного шлака в слое кокса в заплечниках доменной печи [1]. Однако такому интенсивному применению топливных добавок препятствует недостаточно высокая температура дутья.

Существенное повышение температуры дутья позволит обеспечить применение плазмотронов. Горячий восстановительный газ можно получить в плазменных генераторах из природного, колошниково-го или коксового газов, а также других видов топлива. Плазменный генератор устанавливают на приливе сопла фурмы. Восстановительный газ с температурой 2000... 2500 °С смешивается с дутьем непосредственно перед поступлением в печь, что исключает транспортировку горячего дутья на большие расстояния. Эксперименты показали, что расход кокса может быть доведен до 100... 150 кг на 1 т чугуна [7]. Поэтому, на наш взгляд, именно

плазменные технологии лежат в основе максимально возможного применения топливных добавок.

Внедрением плазмы в доменные печи существующей конструкции занималась шведская фирма SKF, разработавшая процесс Plasmablast, который при относительно небольших капитальных затратах позволял продлить конкурентоспособную эксплуатацию многих доменных печей [8].

Фирма CRM (Льеж, Бельгия) разработала процесс Pigogas (плазменная система инжектирования восстановительного перегретого газа). Основные принципы предложены в 1970 г., позже добавлена идея рециркуляции колошниково-го газа доменной печи. Первоначально испытания проводили с использованием метана, конвертированного воздухом или CO<sub>2</sub>. Систему применили в экспериментальной доменной печи с диаметром горна 0,3 м и полезной высотой 2,5 м. С инжекцией природного газа и воздуха достигли расхода кокса 105 кг на 1 т железа при температуре восстановительного газа 2020 °С.

Следующим этапом стало оборудование доменной печи с горном диаметром 4,6 м плазмотроном мощностью 3,5 МВт, расположенным возле одной из восьми фурм, который работал до 159 ч без перерыва в ходе испытаний, продолжавшихся более двух лет. Долговечность электродов составляла 200... 300 ч при мощности плазмотрона около 2 МВт. Целью данных испытаний было не сокращение расхода кокса в доменной печи, а установление возможности промышленного применения плазменных систем. В этом отношении они были успешными [9].

Однако для крупномасштабного промышленного применения низкотемпературной плазмы следовало решить некоторые вопросы. Сейчас обслуживающие остановки крупных доменных печей осуществляются по плану, как правило, каждые 10 недель. Таким образом, долговечность электродов должна превышать 1700 ч. С другой стороны, для крупных печей количество плазмотронов должно быть очень большим при их нынешней мощности и тепловом КПД, который у существующих плазмотронов косвенного действия не превышает 35 %.

Малый ресурс работы плазмотронов и довольно низкий КПД можно объяснить их конструкцией, при которой дуга горит внутри плазмотрона между электродом и соплом. Это приводит к быстрому разрушению этих узлов, особенно при использовании в качестве плазмообразующего доменного или природного газа в смеси с воздухом или кислородом. Указанную проблему можно решить путем использования многодуговых плазменных нагревателей газа с замыканием дуг на среднюю точку в плазме, т.е. вне плазмотрона. Это позволяет достичь высокого ресурса основных узлов, повысить КПД процесса, увеличить мощность плазмотрона. Так, мощность плазменно-нагревательных комплексов, созданных по этой схеме в Институте электросварки им. Е. О. Патона, достигает 6 МВт [10].



В условиях доменной плавки теплообмен между газом и шихтой в нижней части печи не обеспечивает достаточно интенсивного снижения температуры газа, в результате чего на значительном участке по высоте печи температура такова, что зона размягченных материалов достигает большей высоты. При нагреве восстановительного газа в плазменном генераторе интенсивность теплообмена значительно возрастает. Высокая кинетическая энергия газа, нагретого в плазмотронах, установленных в нижней части шахты, обеспечивает сверхзвуковую скорость истечения газа из сопла плазмотрона. Благодаря этому интенсивность передачи теплоты твердому материалу увеличивается в десятки раз, по сравнению с применением кислородного пламени. При этом снижается температура по высоте шахтной печи, и значительно уменьшается протяженность зоны размягчения материалов, что обеспечивает фильтрацию газа через столб материалов даже при отсутствии кокса в составе шихты [7].

Нагрев газа в плазменном генераторе позволяет получить большие удельные тепловые потоки, обеспечивающие интенсивное плавление железорудных материалов в присопловой области плазмотрона. Такой характер плавления железорудного материала способствует образованию в нижней части шахтной печи поверхности плавления и ограниченной этой поверхностью полости. Установлено, процесс движения шихты в шахте, где используются плазменные генераторы, основан на периодическом обрушении свода выплавленной плазмотроном полости. При достаточно больших размерах полости её свод становится неустойчивым, разрушается, и очередная порция материалов поступает в зону плавления. Если размеры полости малы, то свод становится динамически устойчивым. Куски железорудного материала свода размягчаются и слипаются, газопроницаемость столба шихты снижается и его движение прекращается [7, 11].

Размеры выплавленной полости, имеющей, как правило, форму эллипсоида [7, 11, 12], определяются мощностью плазменного генератора, расходом газа, скоростью его истечения из сопла и размером кусков шихтовых материалов. С повышением скорости истечения газа возрастает интенсивность теплопередачи от газа к шихтовым материалам в направлении движения струи, что способствует увеличению скорости плавления и длины выплавляемой полости. По мере удлинения полости уменьшается скорость её распространения. Через определенный промежуток времени, зависящий от газoeлектрических параметров плазменного генератора, выплавленная полость достигает предельных размеров. При этом, если максимальные размеры кусков шихты не превышают критические для размеров выплавленной полости, происходит обрушение свода, и очередная порция шихтовых материалов заполняет выплавленную полость.

Особенности теплообмена в шахтных плазменных печах приводят к резкому снижению значений

температуры по высоте шахты. Это обуславливает минимальные размеры зоны размягчения шихтовых материалов, что в данном случае является положительным фактором, повышающим газопроницаемость столба шихты. С другой стороны, в шахте должен быть выполнен основной объем процессов по восстановлению железорудного сырья, что при указанных условиях невозможно из-за малого времени пребывания здесь железорудных материалов до момента их плавления. Для увеличения скорости восстановления необходимо повысить температуру в шахте на горизонтах, находящихся выше области плавления, путем подачи в неё горячего восстановительного газа.

Определены изменения значений температуры по высоте шахты при подаче через фурмы, установленные на различных горизонтах, горячего восстановительного газа [7]. По-видимому, требуется оптимальное сочетание интенсивности плазменного нагрева и подачи газа на соответствующие горизонты, поскольку чрезмерное повышение температуры по высоте шахты приводит к увеличению зоны размягчения, снижению газопроницаемости столба шихты, а работа одних плазменных генераторов не обеспечивает требуемую скорость восстановления.

Кроме необходимости применения кокса, у доменных печей есть и другие недостатки, например значительные капитальные затраты, непосильные для отдельных фирм без государственной поддержки. По оценкам ООН [13], размер инвестиций в новые мощности доменного производства значительно превышает таковые в новые альтернативные технологии. Поэтому на многих металлургических комбинатах не будут вводиться в эксплуатацию новые домны, поскольку перед предприятиями появится возможность выбора между переоборудованием действующих мощностей и заменой их мощностями, использующими совершенно новые технологии. Строительство заводов с альтернативными схемами производства металла малого и среднего масштаба отличается небольшими капиталовложениями, хотя пока они требуют повышенных расходов энергоносителей. В таблице представлен расход энергии на производство металла по различным технологиям из различных источников.

Следует обратить внимание на энергозатраты, указанные в работе [15]. Здесь показан расход первичной энергии, являющийся интегральным показателем, суммирующим затраты энергии как в рассматриваемом технологическом процессе, так и на всех предшествующих ему стадиях производства, начиная с добычи, переработки и транспортировки энергоресурсов и сырья. Для различных видов топлива затраты первичной энергии включают также его теплотворную способность.

Если в технологическом процессе образуются вторичные энергоресурсы, которые могут быть утилизированы, то их тепловая энергия вычитается из первичной энергии. Таким образом, уже сейчас некоторые процессы бескоксовой металлургии энер-



## Сопоставление энергетики процессов производства чугуна и губчатого железа

Вид энергии	Расход энергии на 1 т железа, ГДж					Примечание
	Доменная печь	Процесс Midrex	Процесс НуL-3	Процесс Corex	Процесс Ромелт	
Общий	17,23	15,30	15,96	35,43	Нет данных	[1]
	20,54	Нет данных		33,17	34... 28,39	[14]
Возвращенный в виде ВЭР	5,11	0,65	0,65	13,83	Нет данных	[1]
Использованный на процесс	5,38	Нет данных		14,13	10... 10,47	[14]
	12,12	14,65	15,31	21,60	Нет данных	[1]
Первичный	15,16			19,04	24... 17,92	[14]
	22,3... 25,8	Нет данных		20,2... 21,8	20... 26,77	[15]

гетически выигрывают у доменного производства. Пока же различные процессы внедоменного получения железа находят свое место в многочисленных вариантах мало- и среднemasштабной металлургии. Например, при выплавке высококачественных сталей в электропечах нежелательно использовать металлолом, поскольку результате многократного переплава в металле накапливаются такие вредные примеси, как медь и мышьяк. Поэтому в качестве шихты используют зачастую губчатое железо.

При производстве губчатого железа из окомкованных концентратов (окатышей) применяют трубчатые вращающиеся или шахтные печи, а из неокомкованных — циклоны или реакторы кипящего слоя.

Указанные в таблице процессы Midrex и НуL-3 осуществляются в шахтных печах. Благодаря противоточному характеру тепло- и массообмена у них зафиксированы хорошие показатели относительно расхода энергии. Самый крупный и, пожалуй, самый успешный проект прямого получения железа в бывшем СССР реализован в г. Старый Оскол, где в 1981–1983 гг. построен электрометаллургический комбинат, в основу производства которого положен процесс Midrex [16]. На рубеже тысячелетий в России на Лебединском ГОКе введена в эксплуатацию установка на базе процесса НуL-3 [17].

В бывшем СССР проводили обширные исследования процессов в трубчатых вращающихся печах. Крупнейшая печь такого типа сооружена на Северном ГОКе (г. Кривой Рог). Однако следует признать, что эти процессы менее экономичны, чем в шахтных печах.

Процессы восстановления в кипящем слое пока не получили широкого распространения, несмотря на возможность использования неокускованного сырья. Сейчас в Украине разработкой процесса этого типа занимается Институт газа НАН Украины [16].

Основными недостатками технологической схемы установка металлизации—электропечь являются вероятность вторичного окисления губчатого железа, потеря тепла при его остывании и повышенный расход электроэнергии в процессе плавки из-за большого количества шлака. Для устранения первых двух создаются схемы, позволяющие переплав-

лять губчатое железо сразу после его выхода из агрегата предварительного восстановления.

Одними из первых разработок в этом направлении в бывшем СССР стали способ и печь В. П. Ремина. Эта печь глетчерного или шахтного типа состояла из двух частей: глетчера, т.е. наклонного пода, или шахты, предназначенных для использования тепла отходящих из электропечи газов с целью нагрева, восстановления до вюститита и плавления шихты, а также электропечи для восстановления руднофлюсового расплава углеродом полукокса до жидкого железа. Важнейшими проблемами, неразрешенными в ходе испытаний, были подвод тепла в зону реакции восстановления железа углеродом из оксидного расплава в начале процесса и подвод оксидов железа в зону реакции при его завершении [18, 19].

В 1981 г. С. Экеторп сформулировал следующие цели плавильной металлургии при условии, что в дальнейшем разработают процессы, конкурирующие с доменной плавкой [16]: применение мелкой руды без предшествующих этапов агломерации при окомковании; применение дешевых видов топлива и восстановителей при полном использовании этих материалов в процессе; малый выход отходящих газов, поскольку при высоких температурах процесса тепловые потери могут быть слишком большими; реализация процесса, позволяющая при необходимых высоких рабочих температурах ограничивать износ огнеупорных материалов; хорошая регулируемость процесса путем ввода сырья, восстановителей и кислорода в заданных количествах; высокая скорость реакций для достижения большой производительности на единицу объема реактора; непрерывность процесса.

Единственной промышленной технологией, позволяющей получать жидкий чугун из кусковых железорудных материалов без использования кокса, является технология Corex. Разработка этого процесса началась в конце 1970-х гг. фирмами «Voest-Alpine Industrieanlagenbau» (VAI, Австрия) и «Deutsche Voest-Alpine Industrieanlagenbau» (DVAI, Германия). Первая промышленная установка Corex пущена в 1989 г. в Претории (фирма «Isco», ЮАР). Сейчас подобные агрегаты эксплуатируют также



фирмы «Posco» и «Hanbo Steel» (обе Южная Корея), «Jindal Vijayanagar Steel» (Индия), «Saldanha Steel» (ЮАР).

В процессе Corex металлургические реакции протекают в двух отдельных технологических реакторах: восстановительной шахте и плавильном устройстве — газификаторе. Кусковые железорудные материалы в шахте восстанавливают до губчатого железа, которое передается транспортными шнеками специальной конструкции в газификатор, где выплавляется чугун. Туда же через систему шлюзов загружают уголь, где он выделяет газ при температуре 1000... 1050 °С. В образовавшуюся из дегазированного угля твердую «постель» вдувают кислород. При этом, кроме выделения теплоты плавления, образуется газ-восстановитель, состоящий на 95 % из CO и H<sub>2</sub>. После выхода газа из газификатора его охлаждают до температуры восстановления 850 °С и очищают от пыли, затем подают в шахту для восстановления кусковой руды или окатышей до степени металлизации свыше 90 %. Примерный расход шихтовых материалов на 1 т чугуна следующий, кг: 1480 руды, 980 угля, 110 известняка, 130 доломита. Расход кислорода составляет 540 м<sup>3</sup>/т, электроэнергии — 75 кВт·ч/т. Для повышения степени использования образующихся газов агрегаты Corex строят в комплексе с установками Midrex и НуL-3 или электростанцией [14, 16].

В Московском государственном институте стали и сплавов под руководством профессора В. А. Роменца разработан процесс жидкофазного восстановления неподготовленных железосодержащих материалов с использованием в качестве восстановителя энергетических углей (процесс Ромелт), осуществляемый в плавильно-восстановительной печи прямоугольного сечения. В пенистый шлак загружают уголь и железосодержащее сырье. Через нижний ряд фурм в боковой стенке агрегата в шлаковый расплав вдувают обогащенный кислородом воздух, который перемешивает шлак, обеспечивает горение угля и образование CO. Отходящие газы дожигаются кислородом, подающимся через ряд фурм над ванной. На пилотной установке с площадью пода 20 м<sup>2</sup> выплавлено более 40000 т чугуна. Есть данные о строительстве в Индии завода с полным металлургическим циклом, выплавка чугуна в котором будет осуществляться в агрегатах Ромелт. Расход шихтовых материалов, указанный в различных источниках, не одинаков, что можно объяснить разнообразием их состава [14, 16, 20].

В Австралии разрабатывают процесс жидкофазного восстановления Ausmelt, где кусковый уголь-восстановитель загружают вместе с шихтовыми материалами в печь. Уголь-топливо перемалывают до размеров частиц 1 мм и вдувают через фурму, которую опускают в шлак. Фурма состоит из концентрических труб. По наружной вдувают воздух, обеспечивающий горение угля и охлаждение фурмы, благодаря чему на ней появляется тонкий слой защитного затвердевшего шлака. Под действием дутья

образуется большая поверхность раздела шлака и газа, что обеспечивает эффективную передачу тепла [14, 16].

Существует множество предложений по использованию плазмы в процессах прямого получения чугуна и стали [21, 22], не нашедших широкого промышленного применения. Значительная их часть заключается в использовании плазмотронов для прямого получения металла в прямоточных и струйных агрегатах.

В прямоточных агрегатах дисперсный восстанавливаемый материал вводят в плазменную струю восстановительных газов под различными углами к оси струи в непосредственной близости к срезу сопла. При этом все процессы (нагрев, плавление, испарение, химические превращения) протекают в объеме газового потока при движении материала вдоль реактора вместе с плазменным газом до выхода в зону, где осуществляется выделение продукта. Струйные агрегаты отличаются от прямоточных тем, что восстанавливаемый материал вводят в плазмообразующий газ до дуги плазмотрона.

Имеются данные о возможности полного восстановления частиц Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> диаметром примерно 50 мкм в водородной струе с температурой 3700 °С за 0,005 с [21]. Исследования процесса восстановления оксидов железа в плазменной струе конвертированного газа в прямоточных реакторах показали возможность полного восстановления при размерах частиц 50 мкм за 0,09 с, 15 мкм — за 0,01 с в условиях температуры 2700 °С. Отмечено, что степень восстановления практически не зависит от избытка восстановителя сверх равновесной концентрации, требующейся для стадии FeO→Fe. Определяющее значение имеет размер частиц и время пребывания их в реакционной зоне.

Однако прямоточным и струйным агрегатам присущи следующие недостатки [11]: малое время пребывания железорудных материалов в высокотемпературной зоне, что вызвано большой скоростью движения и незначительной длиной плазменного факела; необходимость применения однородного по размерам дисперсного железорудного сырья и правильного выбора параметров его ввода (направление, скорость, массовый расход) в плазменную струю для прямоточных агрегатов (невыполнение последнего условия способствует образованию гарнисажа на стенках реактора, перерасходу энергии, нарушению работы реактора); низкая степень использования тепловой и химической энергии плазменного газа.

Стремление улучшить работу плазменного газа при восстановлении из расплава привело к созданию большого количества различных вариантов реакторов, в которых предприняты попытки соединить традиционные металлургические технологии с возможностями плазменного нагрева. Предложена гамма процессов, в которых с целью улучшения показателей тепло- и массообмена обеспечивается встречный поток восстанавливаемых материалов и плазменной струи газа [11].



Следует отметить разработки упоминавшейся ранее шведской фирмы SKF (Plasmared, Plasmasmelt, Elred и др.)

Процесс Plasmared позволяет получать губчатое железо в восстановительной шахтной печи. Небольшую часть рециркулируемого газа шахтной установки пропускают через плазмотроны и нагревают до 4000...5000 °С, основную часть рециркулируемого газа смешивают с нагретым газом и подают в печь восстановления. В плазме можно осуществлять конверсию любого вида топлива, получая газ с содержанием менее 3 % CO<sub>2</sub>. Реконструкция установки прямого получения губчатого железа Wiberg на заводе в Хофорсе с заменой ее на установку Plasmared должна была повысить производительность от 25000 до 70000 т/год и значительно снизить расход энергии. Кроме того, процесс обеспечивает большую свободу в выборе энергоносителей (нефть, газ или уголь) [8]. Благодаря высокому коэффициенту использования энергии, общий ее расход на производство 1 т губчатого железа был значительно ниже, чем на бесплазменных установках с шахтными печами (9,2 в сравнении с 10...11,7 ГДж для установок Midrex) [11].

Аппаратурное оформление процесса Plasmasmelt решено, как комбинация шахтной печи и двух последовательно расположенных реакторов кипящего слоя [7, 8, 11, 16]. Мелкий железорудный материал сначала частично (на 50...60 %) восстанавливается в реакторах в смеси CO + H<sub>2</sub>, а затем передается в шахтную печь для окончательного восстановления. Компоненты шихты (частично восстановленный концентрат, флюс, уголь) вдуваются через плазмотрон, расположенный на горизонте воздушных фурм небольшой доменной печи, заполненной коксом. Концентрат здесь окончательно восстанавливается (за счет твердого углерода угля), плавится и просачивается вниз в горн, откуда выпускают чугун и шлак, как в обычной доменной печи. Необходимое тепло для эндотермической реакции восстановления оксидов железа, а также для плавления чугуна и шлака вносится плазмообразующим газом.

В зоне окончательного восстановления устанавливается температура 1700...2000 °С, тогда как в самом плазмотроне она достигает 3000...5000 °С [16]. Газ проходит через коксовый слой снизу вверх, полностью превращаясь в смесь CO + H<sub>2</sub>, покидает колошник и после соответствующей обработки (охлаждения и очистки от пыли) подается в реакторы кипящего слоя и частично в плазмотрон в качестве плазмообразующего газа.

Необходимо отметить, что столб кокса в шахтной печи принимает лишь незначительное участие в реакциях и используется преимущественно как реакционное пространство, проникаемое для газа, передельного чугуна и шлака. Этот слой сглаживает небольшие колебания при поступлении углерода через плазмотрон, обеспечивает постоянное содержание углерода в чугуне и защищает футеровку печи. Расход угля и кокса в указанном процессе составляет

соответственно 200 и 50 кг, электроэнергии — 1100 кВт·ч на 1 т чугуна [7]. Разработчики процесса полагают, что небольшие (обычно неэкономичные) доменные печи могут быть со сравнительно малыми капиталовложениями переоборудованы для обеспечения экономичного производства передельного чугуна. Существенно, что 90 % кокса здесь может быть заменено некоксуемым углем (а также мазутом или газом), агломерат для этого процесса не требуется, а производительность существующих малых агрегатов увеличивается более чем в два раза [16]. Однако (при всех указанных преимуществах этого процесса для малых агрегатов) результаты их продолжительной эксплуатации до настоящего времени неизвестны.

В процессе Elred частично восстановленная в реакторах кипящего слоя руда вместе со шлакообразующими вводится в рудовосстановительную электропечь через полый графитовый электрод, где окончательно восстанавливается и плавится в плазме электрической дуги. Углерод, поступающий с концентратом, растворяется в металле и частично выносятся из печи газом, при очистке которого он улавливается и снова используется для восстановления. Шлак непрерывно удаляется из печи через специальное окно. Чугун выпускают периодически по мере накопления. Процесс испытан в полупромышленном масштабе. Отходящий из плавильной печи газ содержал до 90 % CO и использовался для получения пара на электростанции. Вырабатываемой электроэнергии хватало для полного обеспечения процесса. Кроме того, при производстве 1 т чугуна в сеть поступало до 400 кВт·ч. Общий расход энергии составлял 15...18 ГДж на 1 т продукта [8, 16].

Дополнительная свобода в аппаратной организации шахтной плавки, обусловленная широкими возможностями в управлении температурой и восстановительным потенциалом дутья при плазменном нагреве, создает предпосылки для разработки оригинальных решений, например печи с двумя шахтами и общим горном [7, 8], с вынесенным горном [7]. В бывшей ГДР [23] предложена схема довосстановления частично восстановленных и расплавленных железорудных материалов газом, активированным в плазме, проходящим через полый графитированный или угольный электрод.

Исследования по применению плазмы в прямом восстановлении черных металлов проводили и в Украине [24]. Способ восстановления металла из расплавленных оксидов может быть использован при производстве ферросплавов на основе марганца, а также для восстановления железа. При этом способе в восстановительный реактор загружают шихтовые материалы, а в плазмотрон, размещенный в нижней части печи, подают плазмообразующий газ (смесь природного газа и кислорода или воздуха). Под действием плазменной струи материал частично восстанавливается в твердой фазе и расплавляется. Довосстановление происходит в жидкой фазе благо-

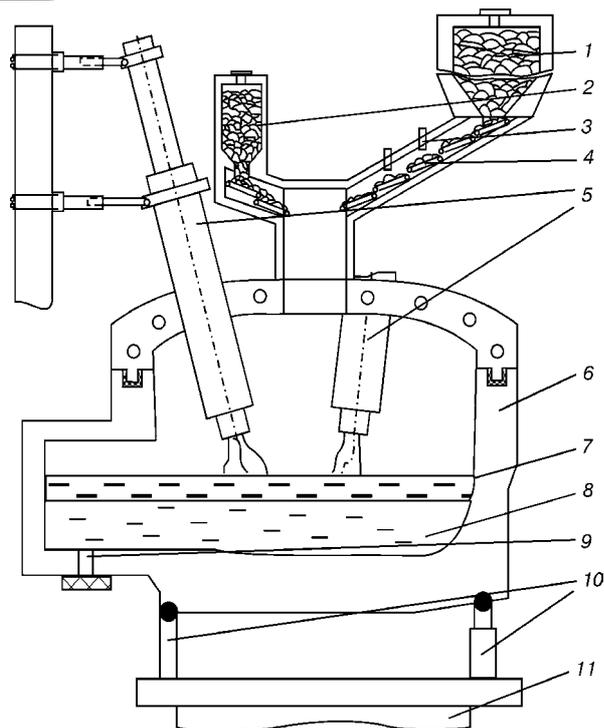


Схема плазменной переработки железорудного сырья: 1 — бункер с железосодержащим сырьем; 2 — бункер со шлакообразующими материалами; 3 — горелки для дожигания отходящих газов; 4 — гусеничный транспортер; 5 — плазменно-нагревательный комплекс; 6 — плавильная камера; 7 — жидкий шлак; 8 — жидкий металл; 9 — эркерный слив; 10 — механизм наклона печи; 11 — механизм опускания/подъема печи

даря продувке расплава плазменной углеводородной струей, содержащей сажистый пироуглерод.

Большое значение имеют работы Днепропетровского металлургического института (ДМетИ), сейчас Национальной металлургической академии Украины (НМетАУ). При разработке технологической схемы ее авторы сформулировали следующие требования к конструкции реактора и способу осуществления процесса [11]:

одностадийный непрерывный процесс получения жидкого металла из окускованного железорудного сырья без применения в шихте кокса должен осуществляться в агрегате, состоящем из шахты и металлоприемника, сообщенных между собой специальным переходным узлом, шахта служит для нагрева, предварительного восстановления твердых железорудных материалов и их плавления, металлоприемник — для довосстановления оксидов железа из расплава, поступающего из шахты, накопления металла и его рафинирования;

плазмотроны (генераторы тепла и газообразных восстановителей) должны устанавливаться как в шахте, так и в металлоприемнике. В шахте (в нижней части) для организации эффективного противотока шихты и газа, плавления предварительно восстановленных материалов, в металлоприемнике — для осуществления эффективных теплообменных процессов в барботажном режиме;

с целью достижения высоких технико-экономических показателей процесса и уменьшения вредных выбросов в окружающую среду целесообразно

отходящий из агрегата газ использовать как энергетическое топливо или окислитель для конверсии углеводородов в плазмотронах.

При участии ДМетИ на Металлургическом заводе им. Г. И. Петровского в 1979 г. сооружена опытная установка производительностью 10 т/сут жидкого металла [11, 25, 26]. В последующие годы ее конструкция многократно совершенствовалась [11, 27–29] с целью увеличения производительности, степени использования химической и тепловой энергии отходящих газов, уменьшения энергозатрат и себестоимости стали.

Следует отметить, что разработчики отказались от первоначальной идеи борбатирования расплава в камере довосстановления и расположили плазмотроны в ее своде. Вероятно, это стало возможным в результате увеличения степени восстановления твердых железорудных материалов в шахтном агрегате. Также произошло существенное упрощение переходного узла между шахтой и металлоприемником.

Авторы признают подобие предлагаемой ими схемы с процессом Согех [27], но отмечают главное отличие в применении в качестве источника энергии низкотемпературной плазмы.

Технологическую схему, предложенную НМетАУ, следует признать удачной, однако нуждающейся в некоторых изменениях. При разработке технологической схемы и конструкции печи основывались на способе плавки металлолома, получившего название Comelt [30], при котором плавление происходит под действием наклонных электродов, а горячий технологический газ нагревает расположенный в шахте столб шихты.

Принципиальная схема плазменной переработки железорудного сырья нам представляется следующим образом (рисунок). Окускованное железорудное сырье предварительно подогревается на транспортере отходящими из плавильной камеры газами. Гусеничный транспортер применяют для равномерной и контролируемой подачи шихты из бункера. Отходящие из плавильной камеры восстановительные газы в районе транспортера перемешиваются с подаваемым через фурмы кислородом для обеспечения необходимой температуры (предельная температура 1100 °С). Подогретое и частично восстановленное сырье поступает в плавильную камеру, где происходит его плавление и окончательное восстановление. Здесь в качестве генератора энергии могут быть использованы плазменный нагревательный комплекс ИЭС им. Е. О. Патона, работающий на смесях аргона (азота) с водородом либо природного газа с воздухом (кислородом) или полые графитированные электроды, в полости которых подаются аналогичные газовые смеси. Шлакообразующие вводят в плавильное пространство из отдельного бункера. Струя восстановительного газа под напором проникает в расплав, благодаря чему увеличивается поверхность раздела фаз, что обеспечивает интенсивную передачу тепла и хорошее использование восстановительного потенциала. Во время



плавления происходит накопление расплава и выделение из него жидкого металла в отдельную фазу. Постоянное поступление шихты обеспечивает высокое удельное содержание в шлаке оксида железа и его высокую активность. Это позволяет уменьшить расход восстановительного газа [16], а также способствует эффективной дефосфорации металла. При накоплении предельного количества расплава подача шихты прекращается, электроды выводятся из камеры, печь опускается и происходит выпуск металла через эркерный слив. Шлак также сливают через эркер, если в нем накапливается большое количество  $P_2O_5$  или  $SiO_2$ , в противном случае следующая плавка происходит с использованием оставшегося шлака.

### Выводы

1. Показано, что применение плазменных источников теплоты в доменном производстве позволяет существенно повысить температуру дутья, результатом чего является более интенсивное использование топливных добавок и уменьшение удельного расхода кокса.

2. Установлено, что плазменный нагрев в шахтных печах уменьшает протяженность зоны размягченных материалов, что может обеспечить фильтрацию газа через столб шихты в отсутствие коксовой насадки.

3. Определено, что использование низкотемпературной плазмы в процессах производства губчатого железа и бескоксового получения жидкого металла в некоторых случаях позволяет повысить их производительность и снизить расход энергии.

1. Андронов В. Н. Перспективы доменного производства // Черн. металл. — 2003. — № 9. — С. 17–22.
2. Писи Дж. Г., Девенторт В. Г. Доменный процесс. Теория и практика / Пер. с англ.; под ред. Ю. С. Карабасова — М.: Металлургия, 1984. — 142 с.
3. Общая металлургия (Металлургия черных и цветных металлов) / Е. В. Челищев, П. П. Арсентьев, В. В. Яковлев, Д. И. Рыжонков. — М.: Металлургия, 1971. — 480 с.
4. Перспективы развития технологии черной металлургии (научные предпосылки) / И. Н. Голиков, Г. В. Губин, А. К. Карклит и др. — М.: Металлургия, 1973. — 568 с.
5. Терещенко В. П. Разработка, исследование и освоение технологии доменной плавки с вдуванием в горн пылеугольного топлива и природного газа при обогащении дутья кислородом: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Донецк, 1994. — 24 с.
6. Люнген Г. Б. Производство чугуна в 2000 году // Черн. металл. — 1995. — № 10. — С. 11–23.
7. Юсфин Ю. С., Гиммельфарб А. А., Пашков Н. Ф. Новые процессы получения металла (металлургия железа): Учеб. для вузов. — М.: Металлургия, 1994. — 320 с.
8. Лопухов Г. А., Падерин С. Н. Плазменная плавка // Теория металлург. процессов. Т. 5. Итоги науки и техники. — М.: ВИНТИ АН СССР, 1982. — С. 3–88.
9. Assessment of prospects for thermal plasma furnace technology. Final report // State of the art: Battelle. — 1984. — № 3. — 222 p.
10. Перспективы использования плазменных источников теплоты в агрегатах внепечной обработки стали. Сообщ. 2 / Г. А. Мельник, О. С. Забарило, А. А. Ждановский и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1991. — № 3. — С. 86–92.
11. Иващенко В. П., Величко О. Г., Терещенко В. С. Прямое одержания металлу з застосуванням низькотемпературної плазми. — Дніпропетровськ: Системні технології, 2002. — 256 с.
12. Особенности движения шихты в шахтном плазменном реакторе / В. К. Савченко, В. П. Иващенко, А. А. Гиммельфарб и др. // Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов (к 85-летию академика Н. Н. Рыкалина): Тез. докл. V всесоюз. совещ. (Москва, 4–6 окт. 1988 г.). — М.: Черметинформация, 1988. — Ч. 1. — С. 103.
13. Реструктуризация черной металлургии — воздействие новых технологий // Европ. эконом. комиссия. — Нью-Йорк; Женева: Организация объединенных наций, 1997. — 97 с.
14. Курунов И. Ф., Савчук Н. А. Состояние и перспективы бездомной металлургии железа. — М.: Черметинформация, 2002. — 198 с.
15. Баптизманский В. И., Паниотов Ю. С., Зеликман В. Д. Анализ энергоемкости процессов получения чугуна и стали // Металл и литье Украины. — 1995. — № 4. — С. 2–5.
16. Бондаренко Б. И., Шатовалов В. А., Гармаш Н. И. Теория и технология бескоксовой металлургии. — Киев: Наук. думка, 2003. — 534 с.
17. Процесс ХИЛ-III: первый опыт в России и перспективы его развития / В. А. Горбачев, Н. Н. Копоть, М. М. Матгуш, Л. И. Леонтьев // Сталь. — 2003. — № 1. — С. 8–10.
18. Развитие бескоксовой металлургии / Н. А. Тулин, В. С. Кудрявцев, С. А. Пчелкин и др. — М.: Металлургия, 1987. — 328 с.
19. Ремин В. П. Получение металла из рудных расплавов // Физико-хим. основы пр-ва стали. — М.: Изд-во АН СССР, 1951. — С. 486–494.
20. Гиммельфарб А. И., Левин М. Я. Проектирование промышленной установки РОМЕЛТ // Сталь. — 1996. — № 4. — С. 19–21.
21. Цветков Ю. В., Панфилов С. А. Низкотемпературная плазма в процессах восстановления. — М.: Наука, 1980. — 360 с.
22. Плазменная металлургия / Ю. В. Цветков, А. В. Николаев, С. А. Панфилов и др. — Новосибирск: Наука, 1992. — 265 с.
23. Pat. 33152 ГДР. Verfahren zu reduction von eisenerzen in schmelzfenosigen zustand mit einem plasmabrenner / J. Fischendorf — Оpubл. 05.12.64.
24. Пат. 31538 Україна, МПК С 21 В 13/00. Спосіб відновлення металу із розплавлених окислів / А. Т. Неклеса. — Оpubл. 15.12.2003; Бюл. № 7.
25. Особенности эксплуатации агрегата прямого получения стали с помощью низкотемпературной плазмы / В. П. Иващенко, С. Н. Дунайчук, А. В. Ревенко и др. // Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов (к 85-летию академика Н. Н. Рыкалина): Тез. докл. V всесоюз. совещ. (Москва, 4–6 окт. 1988 г.). — М.: Черметинформация, 1988. — Ч. 1. — С. 100.
26. Плазменное восстановление железа и никеля из комплексного железоникельсодержащего рудного сырья / С. Н. Дунайчук, В. П. Иващенко, В. К. Савченко и др. // Там же. — С. 101.
27. Разработка рациональной схемы прямого получения жидкого металла / В. П. Иващенко, А. Г. Величко, Ю. С. Паниотов и др. // Теория и практика металлургии. — 2002. — № 2. — С. 3–5.
28. Комплексная схема прямого получения жидкого металла / В. П. Иващенко, А. Г. Величко, Ю. С. Паниотов, В. Д. Зеликман // Металлург. и горноруд. пром-сть. — 2002. — № 4 — С. 10–12.
29. Схема прямого получения жидкого металла с использованием низкотемпературной плазмы / В. П. Иващенко, А. Г. Величко, Ю. С. Паниотов и др. // Там же. — 2002. — № 7. — С. 121–124.
30. Бергер Х., Миттаг П. Дуговая печь Комельт с наклонными боковыми электродами // Черные металлы. — 1996. — № 2. — С. 34–40.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 10.12.2004