

УДК 669.187.012

Технико-экономические и экологические аспекты альтернативных технологий плавки металла в дуговых печах*

В.С. Малиновский, Ф.Е. Дубинская
НТФ "ЭКТА", АО "НИИОГАЗ"

За последние годы широкое развитие получили новые модернизированные электродуговые печи, при проектировании которых были поставлены задачи снижения себестоимости выплавляемой стали и повышения производительности, что особенно важно для мини-заводов с установками непрерывного литья заготовок и высокопроизводительными прокатными станами. Особое внимание уделяется экологии. Как известно, требования, предъявляемые к экологической чистоте производств, особенно в промышленно развитых странах, постоянно ужесточаются.

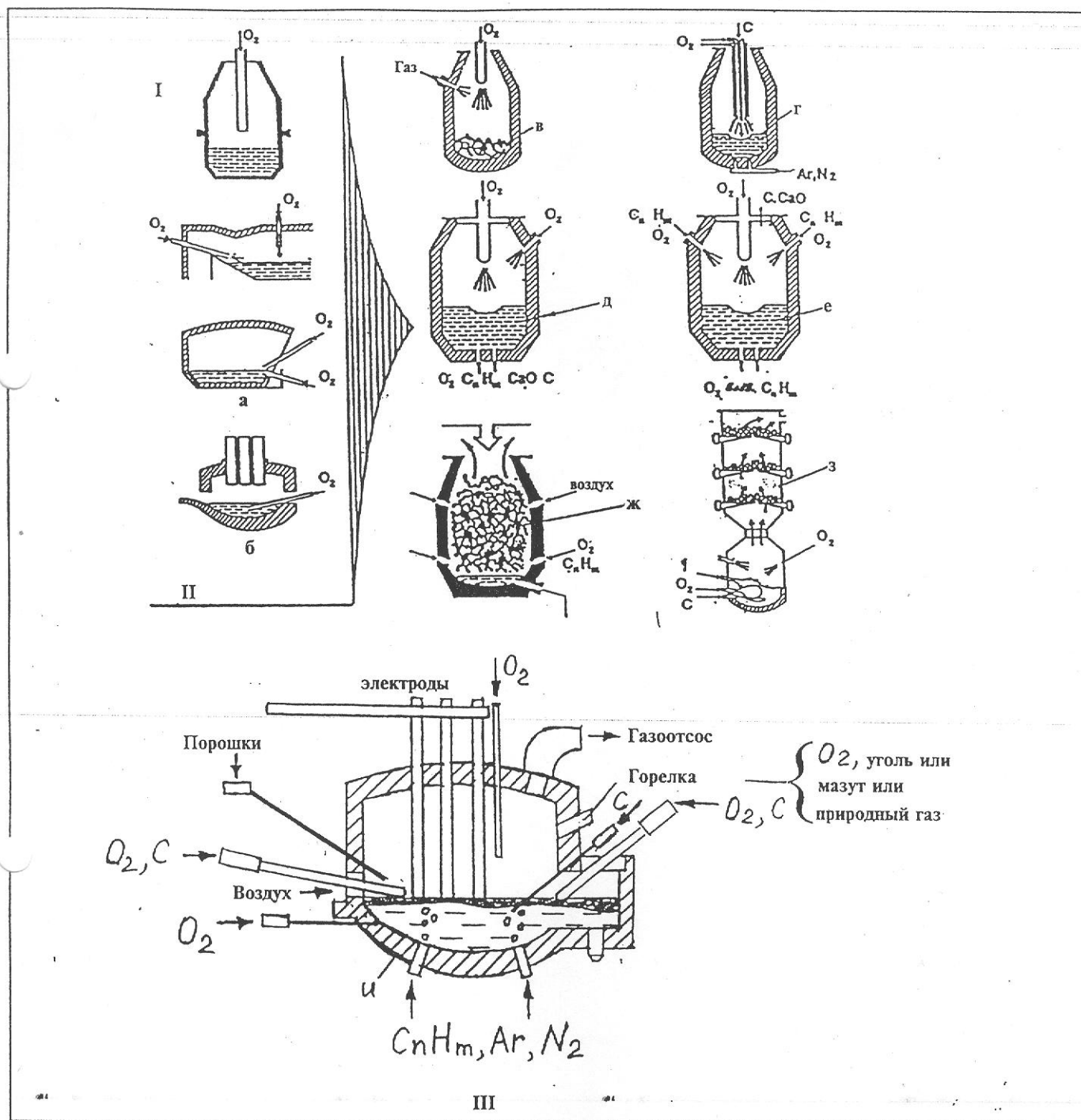
Для снижения воздействия на окружающую среду в промышленно развитых странах предлагается провести рациональное разделение труда между развивающимися странами, производящими полупродукт, и странами, где выпускают готовую продукцию, что, по мнению авторов работы [1], должно стать реальностью в начале следующего столетия. Это указывает на то, что вопросы экологии в действующем сталеплавильном производстве и вновь создаваемых и широко рекламируемых процессах на должном уровне не решены. В настоящее время возникла угроза переноса иностранными фирмами на территорию нашей страны экологически опасных производств и технологий.

Новым решением, заключенным в предлагаемую технологию, является комбинация старых технологических процессов с их преимуществами и недостатками в один технологический аппарат

(рисунок) [1]. Из мартеновского процесса используются нагрев металла топливными горелками и окисление материалов шихты кислородом; из конвертерного процесса — продувка металла кислородом и применение чугуна; из модификаций конвертерных процессов EFK, KMS, KVA — энергия от сжигания угля, природного газа, кислорода, шихты; из EOF — энергия от сжигания тех же элементов и подогрева лома отходящими из печи газами в шахтной установке с удерживающими пальцами. Одним из элементов источников нагрева в предложенной технологии являются электрические дуги постоянного или переменного тока.

Последний вид нагрева следует рассмотреть отдельно. В дуговых сталеплавильных печах (ДСП) старых конструкций выплавляют в основном особую чистую и легированную сталь. Как известно, эти печи имеют широкие технологические возможности, позволяя проводить окислительные и восстановительные реакции, обработку металла шлаками, позволяют реализовать переплавные процессы с сохранением части легирующих элементов из шихты. Кислородное дутье используется в них после расплавления шихты с технологическими целями. В то же время "старые" ДСП имеют серьезные недостатки — низкую производительность, высокие удельные расходы электроэнергии и графитированных электродов, угар шихты — до 3,5 %, уровень шума — до 105 дБА. В газовых выбросах из "старых" ДСП отмечалось наличие вредных составляющих — окислов азота, цианидов, моноокси углерода, количество которых снижа-

*Статья публикуется в авторской редакции.



Автотермические и аллотермические способы производства стали:

I – автотермический конвертер; II – традиционные аллотермические процессы; III – новые аллотермические процессы: а – мартеновская печь; б – ДСП; в – подогрев лома с повышением его доли в шихте до 10 %; г – вдувание углерода и дожигание СО (с повышением доли лома до 15 %); д – К(М)С при 100 % лома; е – Тулачермет / ЕФК при доле лома до 100 %; жс – КВА, 100 % лома; з – EOF, 30–100 % лома, и – горелка; и – Fuchs Systemtechnik / ДСП или ДППТ (источники нагрева – сжигание шихты, кислород, углерод, природный газ, мазут, электроэнергия, кислород воздуха).

ность при увеличении газоплотности печи [3], и шлаки, унос которой составлял 0,6–1,4 % массы шихты. Колебания электрического режима дуг вызывали колебания давления печных газов и соответственно интенсивный газообмен печного пространства с окружающей средой, что заставляло оснащать печи достаточно мощными системами пылегазоудаления и очистки газа от пыли.

В 90-х годах наметились два пути усовершенствования ДСП, один из которых достаточно полно реализован в сталеплавильных агрегатах фирмы Фрукс Системтехник. Современное сталеплавильное производство требует увеличения емкости и производительности печей, сокращения затрат на энергоресурсы и графитированные электроды. Прямым путем решения этих задач могло быть увеличение мощности источников электропитания печей. Однако простое решение натолкнулось на два основных препятствия – ограниченную теплопередачу от дуги непосредственно в металл, что связано с отсутствием достаточного перемешивания расплава в ванне и ограничением ее наиболее эффективной конвективной составляющей, а также вынужденное снижение мощности дуги из-за чрезмерных тепловых потоков от дуги на стены и дно печи, нарастающих в процессе нагрева и расплавления металла. На мощных ДСП тепловые потоки на подину печи в начале расплавления превысили критические значения. Это заставило ввести комплекс вынужденных технических решений, включающих плавку с использованием оставшейся от предыдущей плавки части металла и шлака, что снижает тепловую нагрузку на подину под электродами в начале плавки, продувку металла кислородом для его перемешивания и нагрева в период расплавления, экранирование дуги вспененным шлаком. Для нагрева твердой шихты стали использовать газокислородные, кислородно-мазутные и угольные горелки, установленные в стенах печи. Эта мера тоже вынужденная, так как вскоре после зажигания дуг зона интенсивного нагрева располагается под шихтой. В этой зоне температура расплава из-за высокой концентрации энергии превышает точку кипения, однако выше температуры плавления скорость нагрева шихты ограничена теплопроводностью металлолома. Для ускорения нагрева шихты требуются дополнительные источники тепла. С целью снизить расход электроэнергии в новых печных агрегатах предлагается использовать в шихте жидкий чугун и дожигать СО

внутри печи кислородом. Пылегазовые выбросы из комбинированного агрегата в атмосферу цеха можно предотвратить только его подключением к мощной системе пылегазоотсоса, создающим разрежение внутри печного пространства, но при этом увеличивается поступление в плавильную область воздуха. Технологические возможности новых печных агрегатов резко сократились по сравнению со "старыми" ДСП; при этом они вобрали в себя недостатки каждого примененного вида нагрева. Прежде всего в новой печи возможно проведение только окислительной плавки при высоком (7,5–12 %) угаре шихты и получение полупродукта, который подлежит легированию и рафинированию на установках внепечной обработки. В отличие от "старых" ДСП угар шихты вырос в 2–3 раза; при высоком угаре железа исключена возможность использования многих легирующих элементов (Mn, Cr, V, Ti, Al и др.), содержащихся в металлическом ломе, так как в предложенном процессе они полностью выгорают. В этом случае использование любого легированного лома экономически неэффективно, так как переводит в безвозвратные потери его ценнейшие составляющие, что резко увеличивает потребность в ферросплавах. Комбинация многих видов нагрева в одном агрегате снижает эффективность использования каждого из них, если они применяются одновременно. В качестве примера можно привести результаты работы по применению топливно-кислородных горелок (ТКГ) на печах емкостью 100 и 200 т [4], которые показывают, что энергетически и экономически целесообразно сначала нагреть шихту с помощью ТКГ, а затем вести плавку только с использованием энергии электрических дуг. О высоком угаре шихты и легирующих элементов при расплавлении с применением кислорода известно из теории металлургических процессов [5].

Низкий коэффициент использования энергии комбинированных источников нагрева непосредственно для проведения плавки приводит к необходимости ее "утилизации". Для этого на ДСП установлены шахтные печи с удерживающими пальцами, нагрев шихты в которых ведется отходящими из ДСП газами. В результате, по мнению авторов работы [2], был разработан наиболее совершенный сталеплавильный агрегат для использования в XXI веке; технико-экономические параметры плавления шихты приведены в табл. 1.

1. Техничко-экономические показатели работы шахтных печей фирмы Фукс Системтехник (ШПФ) при плавлении шихты

Энергоноситель и материал	Удельный расход на 1 т стали	Цена, долл. США	Стоимость, долл./т
Электроэнергия	302,0 кВт·ч	0,03	9,60
Кислород	42,8 м ³	0,06	2,57
Шихта (угар 7,5 %)	75,0 кг	0,11	8,25
Природный газ	8,0 м ³	0,08	0,64
Углерод-шлак	3,9 кг	0,15	0,58
Углерод-шихта	15,0 кг	0,12	1,80
Известь для вспенивания шлака	20,0 кг	0,10	2,00
Электроды	1,4 кг	2,50	3,50
Затраты на ликвидацию выбросов**	17,6 кг	0,15	2,64
			$\Sigma = 31,58$

*Цены и расходные характеристики приведены по данным фирм Фукс Системтехник и Даниели.

**Количество выбросов на 1 т стали 17,6 кг.

Если в ШПФ вести плавку стали, используя низколегированный лом, например из судовой стали Е-32 (ГОСТ 5521-86), то угар легирующих элементов выразится в виде дополнительной потери 25 долл./т, а при переплаве высоколегированного лома стоимость "сгоревших" легирующих элементов шихты может достигать 60 долл./т. Возможность получения экономического эффекта от снижения утара легирующих элементов в шихте связана с организацией сортировки металлического лома и выбора сортамента получаемой стали с учетом химического состава шихты. При наличии печного агрегата, в котором при переплаве легирующие элементы не угорают, определяющими могли бы стать работы в направлении снижения себестоимости стали и организации экологически чистых процессов.

Для дальнейших технико-экономических оценок введем показатель Q_{33} . Он соответствует количеству электрической энергии, которую можно приобрести на получение 1 т жидкой стали за счет стои-

мости энергетических и материальных средств, затраченных на плавку стали в различных плавильных агрегатах. Для ШПФ эти затраты составляют 31,58 долл./т (табл. 1). Для углеродистой стали $Q_{33} = 31,58/0,03 = 1050$ кВт·ч/т. При переплаве низко- и среднелегированного лома в ШПФ при стоимости потерь легирующих элементов 20 долл./т $Q_{33} = 1700$ кВт·ч/т. Показатель Q_{33} может служить характеристикой экономичности технологического процесса производства жидкой стали и указывает на то, что экономия электроэнергии не является определяющим фактором при выборе способа плавки. Например, по этому показателю энергетически оптимизированные печи EOF фирмы KLSE [2, 6], в которых при получении полупродукта удар металла и производительность печи различаются незначительно по сравнению с ШПФ, имеют близкий по величине показатель Q_{33} , но при этом электроэнергию на плавку не потребляют.

Серьезными экономическим и экологическим недостатками печей типа ШПФ, EOF и др. являют-

ся интенсивное пыле- и шлакообразование. Процессы с высоким угаром металла и расходом шлакообразующих материалов приводят к образованию 0,12–0,15 т твердых отходов при выплавке каждой тонны стали, которые содержат значительные количества вредных веществ (Pb, Zn и др.) и создают экономические и экологические проблемы при их утилизации и хранении. Данные по параметрам шлакообразования в зарубежных источниках отсутствуют, хотя их оценка может серьезно повлиять на значение $Q_{\text{зз}}$, в том числе при определении затрат на утилизацию и хранение шлака. Технология плавки в ШПФ исключает проведение восстановительных процессов, шлак имеет "произвольный" состав, содержит большое количество окислов металла и при сливе должен быть отсечен от расплава. Это достигается организацией донного слива. Заделку отверстия в подине печи перед плавкой проводят специальными огнеупорами, стоимость которых на крупнотоннажных печах влияет на себестоимость стали незначительно, но на мало- и среднетоннажных печах эти затраты необходимо учитывать. Дополнительные затраты при работе ШПФ вызывает также необходимость резки лома.

Широкое совмещение различных видов нагрева в одном агрегате создает значительные затруднения при защите окружающей среды, особенно воздушного бассейна. В работе [2], информации фирмы KLSE и других публикациях при анализе вредных выбросов в атмосферу в процессе плавки стали ответственной за основные загрязнения считают электрическую энергию. С этим трудно согласиться. На металлургическое предприятие электрическая энергия поступает как экологически чистый источник нагрева. При определении цены на электроэнергию учитывают инвестиции на улучшение экологии электростанций и в этом направлении энергетики добились значительных успехов. Задача металлургов внести свой вклад в улучшение экологии собственных производств, избегая процессов, увеличивающих загрязнение окружающей среды.

Экология металлургического производства обеспечивается двумя основными звеньями: процессом нагрева и плавления шихты (I); очисткой газа от вредных веществ (II), образовавшихся в звене I.

Улучшение показателей звена I снижает себестоимость стали, с усилением звена II себестоимость стали увеличивается. Требования экологов непре-

рывно возрастают, поэтому единственный путь снижения себестоимости стали возможен в звене I.

С этих позиций в ШПФ экологически чистая электрическая энергия замещается химическими источниками энергии, вследствие чего при выплавке 1 т стали образуется около 100 кг CO_2 [2]. В печи с комбинированным нагревом, особенно оснащенной насадкой в виде шахтной печи, необходимо поддерживать определенное разрежение, предотвращающее задымленность рабочего помещения и обеспечивающее прокачку горячих газов через шахтную печь. В этих условиях невозможно уплотнить печь и предотвратить образование окислов азота, количество которых даже на выходе из мощной системы газоочистки составляет 0,2–0,3 кг/т расплава [2] и цианидов до 28,4 г/т [6].

Как показала практика эксплуатации печей с использованием химического топлива, выплавка стали в них сопровождается выносом в атмосферу с отходящими газами повышенного количества паров масел, диоксидов серы и диоксида [1]; как известно, диоксины – смесь полихлордибензо-парадиоксинов (ПХДД) и полихлордибензофуранов (ПХДФ). Это хлорпроизводные углеводородов, обладающие высокой адсорбционной способностью и поэтому практически целиком связывающиеся с частицами пыли. Они чрезвычайно стойки и являются одним из самых токсичных выбросов. Диоксины образуются при сравнительно низкой температуре [8], поэтому периодически появляющееся утверждение (например, сообщение М. Хайсиг и др. [2]), что они разрушаются при температуре, которая поддерживается в плавильных агрегатах, безосновательно, так как диоксины вновь возникают в "холодной зоне".

Производственный опыт указывает на вредные экологические последствия проведения плавления с помощью химического топлива и кислорода [3, 6, 8, 9–11], особенно усиливающиеся при их совместном использовании с электрической дугой (информации фирм KLSE и BSE), которая является активатором химических реакций, способствующим, например, образованию окислов азота, цианидов и диоксинов.

По приведенным в работе [2] данным отходящие от печи газы при комбинированном нагреве выносят около 135 кВт·ч/т энергии. Использование шахтной насадки позволяет утилизировать часть энергии на нагрев лома и потери энергии с отходя-

щими газами уменьшаются до 65 кВт·ч/т. Поступающие в систему пылегазоочистки газы характеризуются крайне неравномерным содержанием вредных примесей. Так, при среднем содержании 1–2 % СО пиковая концентрация СО достигает 6–7 %, а содержание легколетучих органических соединений колеблется от 4600 до 16000 ppm и более. Так как температура отходящих из шахтной печи газов изменяется от 200 до 800 °С, за выходом из шахтной печи устанавливается камера дожигания, где отходящие газы должны нагреваться с помощью горелок до температуры выше 750 °С [2]. Из других источников известно, что температура газа, обеспечивающая эффективное разрушение СО и диоксинов, должна быть не менее 1200 °С, при содержании кислорода более 3 % и пребывании дымовых газов в этих условиях не менее 2 с [12]. Производительность системы пылегазоудаления при комбинированном нагреве, например для 100-т печи, составляет более 1 млн м³/ч дымовых газов [3]. Печные газы, которые необходимо очистить от пыли, содержат в большом количестве Zn, Pb и по ходу удаления после шахтной печи должны быть нагреты с 200 до 1200 °С. Это необходимо для ликвидации токсичных газов, пики концентрации которых многократно превышают средний уровень. Следовательно, затраты на звено II – систему пылегазоочистки ШПФ весьма значительны и при ужесточении требований экологов проблемы очистки газов не решены [2]. Одной из главных причин, затрудняющих решение экологических проблем, связанных с эксплуатацией ШПФ и других ДСП, оснащенных шахтными насадками, является несоответствие условий работы ДСП и любого вида нагрева шихты отходящими газами. Для первой необходима высокая мощность во все периоды плавки, обеспечивающая высокую производительность, но вследствие этого в звене II формируются пики газовыбросов и концентрации вредных веществ в них. Так, в ШПФ при цикле плавки 38 мин органические компоненты выгорают за 5–10 мин в тот период, когда температура отходящих из шахтной печи газов минимальна и требуются затраты энергии в системе газоочистки для их нагрева и утилизации. Поэтому более предпочтительным является предварительный нагрев лома в независимых от ДСП установках в оптимальных для экологии условиях. По информации фирмы BSE предварительный нагрев лома вне

плавильной системы позволяет в 10 раз снизить выбросы диоксинов и обеспечивает экономию электроэнергии [13].

К большим недостаткам печей с комбинированным нагревом следует отнести генерируемый дугами и горелками шум, уровень которого достигает 120 дБА (у "старых" ДСП – 103–105 дБА).

Для улучшения экологических показателей сталеплавильного производства и снижения себестоимости стали была разработана концепция дуговой печи постоянного тока (ДППТ) [13], основные элементы которой включают подавление окисления шихты и испарения металла вследствие перегрева под дугой, а также уменьшение пылегазовыбросов путем стабилизации электрического режима дуги. Также предполагалось значительное снижение шума и угара графитированных электродов.

Правильность концепции была подтверждена после ввода в промышленную эксплуатацию ДППТ емкостью 30 т на ПО "Ижсталь" [14, 15], выполненную путем перевода ДСП-25 на питание постоянным током. При реконструкции ДСП-25 не ставилась задача увеличить производительность печи. Главной целью являлось улучшение экологии. Компенсация затрат достигалась путем уменьшения угара металла и графитированных электродов. В результате реконструкции уровень пылегазовыбросов из печи при выплавке углеродистой стали уменьшился в 7–10 раз и составил 0,52–0,97 кг/т. В ДППТ газы содержат 35–50 % СО, 8,2–9,4 % СО₂, 0,4 % О₂, 0,0003 % SO₂, 0,0002–0,0003 % NO_x и N₂ – остальное. При выходе из отверстия в своде печные газы догорают и содержание СО снижается до 0,5–0,8 % [14]. Отходящие газы засасываются в систему газоудаления, в которой поддерживается расход газовоздушной смеси около 30000 м³/ч, где разбавляются вредные примеси и их содержание уменьшается значительно ниже уровня ПДК. При кислородной продувке и расходе газа в системе пылегазоудаления 58000 м³/ч концентрация пыли в ДППТ, как и в ДСП, составляет 1,4 г/м³ и для ее улавливания следует устанавливать систему очистки небольшой производительности, полезную также для улавливания Zn и Pb, но в этом случае производительность системы вытяжки может быть значительно уменьшена. Как и в любой дуговой печи при использовании шихты с высоким содержанием масел, эмульсий и других органических соединений их отгонка является непродолжитель-