

УДК 669.11:546.72:621.745

**В. Н. Демидик, Т. П. Колодная, Е. Н. Нагорная**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

### **ВЫБОР СЫРЬЯ – ОДИН ИЗ РЕШАЮЩИХ ФАКТОРОВ ДЛЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*Выполнен анализ зарубежной и отечественной информации о состоянии сырьевого металлургического рынка. Представлен технико-экономический обзор процессов прямого получения железа и бескоксowego получения чугуна. Сделан сравнительный балансовый расчет получения чугуна доменным и бескоксowym способами, дана стоимостная и энергетическая оценка основных процессов прямого получения железа в Украине.*

*Виконано аналіз закордоної та вітчизняної інформації про стан сировинного металургійного ринку. Надано техніко-економічний огляд процесів прямого отримання заліза та безкоксowego отримання чавуну. Зроблено порівнювальні балансові розрахунки отримання чавуну доменним та безкоксowym способами, наведено вартісну та енергетичну оцінку основних процесів прямого отримання заліза в Україні.*

*The foreign and domestic information on raw material metallurgical market is analyzed. The comparative balance calculation of cast-iron production by blast-furnace and cokeless methods is done. The cost estimation of basic processes of direct iron recovery in the conditions of Ukraine is given.*

**Ключевые слова:** сырье, сталь, железная руда, черные металлы, железо, чугун, лом, коксующий уголь.

В 2000 г. объем мирового производства стали составлял 848 млн. т, в 2007 г. – 1344,3 млн. т. Такой рост производства стали привел к существенному напряжению на мировом рынке наличия и поставок сырьевых и топливных материалов. Производители электростали (мини-заводы) и заводы с полным циклом в равной мере зависят от состояния сырьевого и топливного рынков. Оба направления столкнулись с беспрецедентным ростом цен на сырье.

На заводы с полным металлургическим циклом значительное воздействие оказал взлет цен на железную руду (до 70 % в 2005 по сравнению с 1990 г.). Но с апреля 2008 г. мировые цены на руду выросли еще на 70 % по сравнению с 2007 г. [1].

Интерес заводов к лому черных металлов, а также изменение цен на металлопродукцию, вызвали рост цен на лом и увеличение объемов мировой торговли. В Европе цена на лом черных металлов выросла с 80 в 2000 г. до 650 \$/т в августе 2008 г.

В себестоимости произведенного металла коксовая составляющая достигает 25 %, поэтому данному виду сырья уделяется особое внимание. Совокупный объем мирового производства кокса в последние годы составил 400 млн. т. В настоящее время в странах ЕС самым дорогим видом топлива является кокс, производство которого, безусловно, зависит от наличия коксующего угля. Согласно имеющимся оценкам, объем между-

## Специальные способы литья

народной торговли коксующимся углем в ближайшие годы будет увеличиваться в среднем на 3,8 % в год и к 2013 г. возрастет на 55 млн. т, достигнув 280 млн. т. Сегодня уголь называют топливом XXI века и считают, что человечество переживает эпоху восхода новой угольной эры. По данным Еврокомиссии мировые запасы угля составляют 900 млрд. т, ежегодная добыча - 4,5 млрд. т, то есть запасов хватит на 200 лет [2]. В 2008 г. отмечено трехкратное повышение цены на коксующийся уголь по сравнению с 2007 г., в марте 2008 г. она составляла 400 \$/т.



Рис. 1. Общемировое производство DRI/HBI [3]

Итак, рост цен на сырье и стремление к получению качественной стали изменили отношение металлургов к процессам прямого получения железа и чугуна и вызвали приток инвестиций в предприятия, использующие эти процессы.

Мировой выпуск прямовосстановительного железа (DRI) и горячбрикетированного железа (HBI) поднялся с 790 тыс. т в 1970 г. до 63 млн. т в 2006 г., а к 2012 г. эксперты прогнозируют рост до 95-100 млн. т. (рис. 1), что

намного больше по сравнению с ранним прогнозом. Основные производители и потребители: Индия, Венесуэла, Иран, Мексика.

Из всего технологического многообразия процессов прямого получения железа на рис. 2 представлены основные технологии, использующие комбинации железной руды и восстановителя [4].

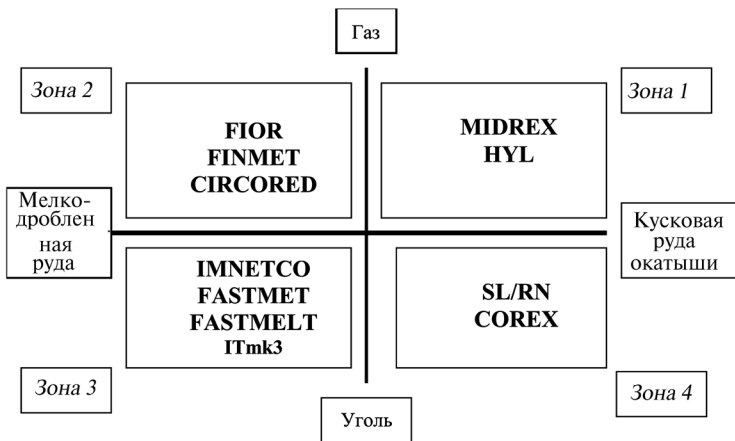


Рис. 2. Комбинации различных типов железной руды и восстановителей

Газофазные процессы являются доминирующими в производстве железа прямого восстановления (Midrex, HYL), на их долю приходится около 85 % мирового объема производства этого продукта. Технология этих процессов основана на использовании продуктов каталитической конверсии природного газа для восстановления железной руды в шахтной печи (Midrex) или реторте (HYL). Непосредственное использование железорудной мелочи (процессы Fior, Finmet, Circored) обеспечивает значительное сокращение производственных расходов при получении железа прямого восстановления. Возможной опцией для металлургических комбинатов с полным циклом является использование обогащенного водородом коксового газа в качестве газа-восстановителя в цехах прямого восстановления, если газ не поступает на электростанции для выработки электроэнергии.

Особенности технологии восстановления, основанной на углетермических процессах, по сравнению с газофазными состоят в следующем: меньшие размеры установок и меньшая производительность, больший удельный расход энергии, повышенные температуры восстановления, пониженное содержание углерода в полученном продукте.

Основными технологиями, базирующимися на применении твердых восстановителей, являются процессы восстановления во вращающейся обжиговой печи (Inmetco, Fastmet, Comet, ITmk-3 и др.). Преимущество технологии состоит в коротком времени реакции и возможности использовать различные сорта некоксуемого угля. Печи с вращающимся подом обеспечивают очень высокую эффективность утилизации энергии (более 80 %) и имеют минимальные выбросы загрязняющих веществ. Но недостатками данной технологии являются высокое содержание пустой породы в полученном железе и низкая производительность из-за конструктивных ограничений по диаметру печи и высоте засыпки.

Термин «жидкофазное восстановление» ассоциируется с производством жидкого чугуна из железной руды без применения кокса в качестве восстановителя. Это процессы Corex/Finex, Hismelt, Tescored. Процесс Corex основан на комбинированном применении плавильного газификатора и восстановительной шахты, экономическая эффективность процесса повышается за счет утилизации отходящего газа, который может быть использован в парогенераторе или как восстановитель.

Так как железо прямого восстановления характеризуется высокой степенью чистоты по содержанию примесей, можно существенно уменьшить поступление в сталь нежелательных элементов, прежде всего меди, а также хрома, никеля и молибдена, а активное выделение СО (СО-кипение) ускоряет удаление цинка, свинца и  $N_2$ .

Доля железа в 30 % позволяет снизить содержание азота уже до 0,005 %, при доле в 75 % содержание азота достигает значений 0,003 %. Таким образом можно производить стали с повышенной стойкостью к старению [5].

В последние годы доля железа прямого восстановления в шихте печей увеличивалась быстрее, чем возрастал объем выплавки электростали. А повышение степени металлизации используемого железа с 90 до 95 % снижает расход электроэнергии в дуговой печи на 15-20 кВт · ч/т, увеличение степени металлизации на 1 % ведет к повышению производительности на 1 %. Экономия от использования горячего железа прямого восстановления составляет ~ 20 кВт · ч/т на каждые 100 °С при 100 %-ном содержании DRI в шихте.

Производство стали в Украине в 2007 г. составило 42,83 млн. т, электросталеплавильное производство – 4 %, мартеновское – 45 %. Украина единственная в мире имеет такой огромный объем мартеновской стали, 80 % металлургической продукции экспортировано, в то же время импорт металлопродукции вырос на 24,1% по сравнению с 2006 г. и составил 2859,5 тыс. т на сумму \$ 2238,6 млн. [6].

Крупнейшими импортерами стальных полуфабрикатов являются металлообрабатывающие и трубопрокатные предприятия. Национальные металлургические комбинаты не могут обеспечить требуемое качество продукции из-за отсутствия необходимых производственных мощностей и шихтовых материалов. Частично эту проблему можно решить заменой необходимого для плавки количества лома на железо прямого восстановления и таким образом уменьшить поступление в сталь нежелательных элементов.

Выбор технологии получения металлизированной продукции зависит от экономических факторов, которые связаны с капитальными и эксплуатационными затратами, а также с себестоимостью продукта. С этой целью выполнены расчеты себестоимости, удельных капитальных вложений и минимальной продажной цены в Украине: в доменных печах с вдуванием пылеугольного топлива (ПУТ), твердофазных процессах Midrex и NYL-III и жидкофазных процессах Corex и Hismelt, учтены сырье, расходы по переделу, попутные продукты (табл. 1).

Если сравнить процессы по цене, то стоимость чугуна с вдуванием ПУТ равна стоимости продукта Midrex, продукция процесса Corex стоит дороже. Самые низкие затраты на топливо в твердофазных процессах, так как в рассматриваемый период газ был дешевле кокса.

Таблица 1. Техничко-экономические показатели производства чугуна и первичного железа по различным технологиям во внутренних ценах Украины, долл. США

Показатели	Цена		Доменная печь		Corex		Hismelt		Midrex		HYL-III	
	кол-во	сумма	кол-во	сумма	кол-во	сумма	кол-во	сумма	кол-во	сумма	кол-во	сумма
<b>I</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	
A. Мощность установок, тыс. т/год	3500			800		600		1000		1000		
B. Себестоимость												
1. Сырье и основные материалы:												
агломерат*, т	1,0000	130,00										
окатыши доменные*, т	0,6000	163,00	97,80	1,4500	236,35							
окатыши для												
металлизации*, т		183,00						1,4000	256,2	1,4500	265,35	
концентрат (65 % Fe), т		123,00					1,4700	180,81				
<b>Итого сырья</b>	<b>1,6000</b>		<b>227,80</b>	<b>1,4500</b>	<b>236,35</b>	<b>1,4700</b>	<b>180,81</b>	<b>1,400</b>	<b>256,2</b>	<b>1,4500</b>	<b>265,35</b>	
2. Флосы:												
известняк, т		24,50										
известь*, т		110,00		0,3370	8,26		0,1890	20,90				
3. Топливо:												
кокс*, т	0,3200	400,00	128,00									
пылеуголь*, т	0,1600	152,00	24,30				0,8010	121,75				
уголь энергетический												
(28 % летучих), т	1,0000	130,00		1,0000	130,00							
природный газ, тыс. м <sup>3</sup>		225,00					0,0510	11,48	0,3164	71,10	0,3340	
<b>Итого топлива</b>			<b>152,30</b>		<b>130,00</b>			<b>133,23</b>	<b>71,19</b>	<b>71,19</b>	<b>75,15</b>	
4. Расходы по переделу			58,68		167,60			159,25	108,50		121,72	
в том числе:												
электроэнергия, МВт · ч	0,0231	81,10	1,87	0,0800	6,49	0,0600	4,87	0,1100	8,92	0,1000	8,11	
кислород*, тыс. м <sup>3</sup>	0,0300	118,80	3,56	0,5270	62,60	0,1634	19,41					
амортизация			4,36		11,33		12,04		8,57		10,63	

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5. Общезаводские расходы			5,87		16,76		15,95		10,85		12,17
<b>Всего затрат</b>			<b>444,65</b>		<b>558,97</b>		<b>510,03</b>		<b>446,74</b>		<b>474,39</b>
6. Попутная продукция (-):											
граншлак, т	23,8	0,2650	6,31	0,4400	10,47	0,4200	9,9				
доменный газ, тыс. м <sup>3</sup>	7,1	0,696	4,66	1,1250	91,24	0,1580	12,82			0,0750	6,08
электроэнергия ВЭР, МВт · ч	81,10										
<b>Итого попутной продукции</b>			<b>10,97</b>		<b>101,71</b>		<b>22,81</b>				<b>6,08</b>
Производственная себестоимость			433,68		457,26		481,22		446,74		468,31
Внепроизводственные расходы			13,01		13,72		14,61		13,40		14,05
Полная себестоимость			446,69		470,98		501,83		460,14		482,36
В. Удельные капитальные вложения:			305,24		419,09		369,85		249,00		305,25
Миниальная продажная цена			492,47		533,84		557,31		497,49		528,15

\*Учитывается по производственной себестоимости

## Специальные способы литья

Если читать попутную продукцию в виде вторичных энергоресурсов (ВЭР), то наибольшее их количество утилизируется в процессе Согех, что на 18,2 % сокращает себестоимость продукта. Капитальные затраты в жидкофазных процессах высокие, они зависят от невысокой мощности агрегатов.

Для анализа минимальной продажной цены выплаваемой стали выполнен расчет ее себестоимости и капитальных вложений при различных технологических схемах (табл. 2): ДП-КК – переплав доменного чугуна в конвертере; Midrex-ЭДП - переплав

**Таблица 2. Техничко-экономические показатели производства стали по различным технологическим схемам во внутренних ценах Украины, долл. США**

Показатели	Цена	ДП-КК		Midrex-ЭДП		Лом-ЭДП	
		кол-во	сумма	кол-во	сумма	кол-во	сумма
А. Единичная мощность сталеплавильного агрегата, тыс. т/год		2500		800		1000	
Б. Себестоимость стали							
1. Сырье и основные материалы:							
чугун доменный*, т	449,52	0,8100	364,11				
лом, т	400,00	132,00	132,00	0,4500	180,00	1,1220	448,80
металлизированные окатыши*, т	446,74			0,7000	312,72		
ферроспалавы, т	2530,00	0,0200	50,60	0,0200	50,60	0,0200	50,60
Итого сырья		1,1600	546,71	1,1700	543,32	1,1420	499,40
Отходы (-)	72,00	0,0270	1,94	0,0240	1,73	0,0240	1,73
<b>Итого за вычетом отходов</b>			<b>544,77</b>		<b>541,59</b>		<b>497,67</b>
2. Добавочные материалы:							
известь*, т	110,00	0,0700	7,70	0,0740	8,14	0,0650	7,15
плавиковый шпат*, т	342,00	0,0010	0,34	0,0020	0,68	0,0020	0,68
руда (окатыши), т	90,00	0,0010	0,09	0,0120	1,08	0,0120	1,08
магнетитовый порошок, т	517,75			0,0123	6,37	0,0123	6,37
доломит обожженный, т	409,40	0,0080	3,27				
коксик, т	119,00	0,0010	0,12	0,0120	1,43	0,0130	1,55
шлакообразующая смесь, т	475,20	0,0015	0,71	0,0010	0,50	0,0010	0,50
<b>Итого добавочных материалов</b>			<b>12,20</b>		<b>18,20</b>		<b>17,33</b>
3. Расходы по переделу в том числе:			8,51		60,53		48,43
электроэнергия, МВт · ч	81,10	0,0170	1,38	0,5760	46,71	0,4600	37,30
электроды, кг	5,40			1,90	10,26	1,40	7,56
кислород*, тыс. м <sup>3</sup>	118,80	0,0600	7,13	0,0300	3,56	0,0300	3,56
4. Общезаводские расходы			0,85		6,05		4,84
Производственная себестоимость			566,33		626,37		568,27
5. Внепроизводственные расходы			16,99		18,79		16,86
6. Полная себестоимость			583,32		645,16		585,32
7. Удельные капитальные вложения			378,98		429,15		204,51
Минимальная продажная цена			640,67		709,53		616,00

\*Учитывается по производственной себестоимости

металлизированных окатышей (60 %) в дуговой печи; Лом-ЭДП - переплав металлолома (100 %) в электродуговой печи.

Лучшие показатели производственной себестоимости стали имеет схема ДП-КК, что объясняется высокой производительностью агрегатов и низкими затратами по переделу, которые составляют всего 1,5 %. Почти аналогичная производственная себестоимость стали по схеме Лом-ЭДП и выше – по схеме Midrex-ЭДП.

Минимальная продажная цена стали, полученной по схемам ДП-КК и Лом-ЭДП, почти равноценная, а по схеме Midrex-ЭДП она выше (709,5 \$), но в данных расчетах не учтено качество шихтовых материалов и полученного продукта.

В то же время, используя данные технико-экономического обоснования [7] для мини-завода «Ворскла Сталь» (Полтавская область), где планируется цех прямого восстановления железа с двумя установками Midrex, нами получена ориентировочная себестоимость стали – 613,5 \$/т (в ценах 2007 г.).

Необходимо отметить, что процессы прямого восстановления не являются конкурентом доменному процессу, они альтернатива ему, сопутствующие процессы для повышения качественных характеристик стальной продукции.

В качестве общей характеристики можно отметить, что DRI/HBI не имеют нежелательных примесей цветных металлов, характерных для металлолома и затрудняющих получение высококачественных марок стали. Другим преимуществом, достигаемым при частичном применении DRI/HBI вместо металлолома или чугуна, является уменьшение удельной эмиссии CO<sub>2</sub> на 1 т слэбов, так как при этом сокращается требуемая выплавка чугуна и соответственно уменьшается расход угля на коксохимическом заводе и в доменном цехе.

В данной работе рассмотрены процессы прямого получения железа и стали, которые в настоящее время представляются реалистичными с технической и производственной точек зрения. Помимо этого, в мире известны многочисленные разработки и идеи, основанные на использовании угля и электроэнергии, например, циклонная плавка или разработанный в Мичигане (США) процесс микроволновой плавки (UP Steel), а также прямой электролиз железной руды, которые в далеком будущем могут явиться новыми этапами в черной металлургии.

### Список литературы

1. “Золотая” руда // *Металл бюллетень*. Украина. - 2008. - № 4. - С. 12.
2. *Рудык В. И.* Уголь - 2008 - стратегический ресурс для энергетики и металлургии // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 2008. - № 2. - С. 14-18.
3. *Люнген Х.-Б., Кноп К., Стеффен Р.* Современное состояние процессов прямого и жидкофазного восстановления железа // *Чер. металлы*. - 2007. - № 2. - С. 13-25.
4. *Такуйя Негами.* Поколение «нагетс» выбирает уголь // *Металлургический компас*. Украина - Мир. - 2007. - № 3. - С. 39-45.
5. *Шнабель С.* От железа прямого восстановления до высококачественной стали // *Чер. металлы*. - 2004. - № 6. - С. 20-23.
6. *Попов В., Шейко А.* Исторический максимум // *Металл*. - 2008. - № 2. - С. 61-63.
7. *Кравченко Ю. С., Малик А. А.* В Украину приходит инновационный электросталеплавильный процесс // *ОАО «Черметинформация». Бюл. «Чер. металлургия»*. - 2008. - № 3. - С. 58-62.

Поступила 19.01.2009