УДК 662.742.1

ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРИГОДНОСТИ ПОЛУКОКСА КАК УГЛЕРОДИСТОГО ВОССТАНОВИТЕЛЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МАРГАНЦЕВЫХ И КРЕМНИСТЫХ СПЛАВОВ

Шубина А.А.¹, инженер отдела хроматографии, экологии
и нефтепродуктов (osokina.alina@inbox.ru)

Журавлева Н.В.^{1,2}, д.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии,
генеральный директор (zhuravleva_nv@zsisic.ru)

Коротков С.Г.², к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии (kafedra-TEE@yandex.ru)

Лазаревский П.П.³, к.т.н., главный специалист технологического
отдела (lazarevskiy_pp@sgmk-group.ru)

Романенко Ю.Е.³, к.т.н., ведущий специалист технологического
отдела (romanenko_ye@sgmk-group.ru)

¹АО «Западно-Сибирский испытательный центр»

(654006, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Орджоникидзе, 9)

²Сибирский государственный индустриальный университет

(654007, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

³ООО «Регионстрой»

(654041, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кутузова, 37а)

Аннотация. Представлены результаты апробации применения полукокса в качестве углеродистого восстановителя при производстве марганцевых и кремнистых сплавов. Установлена принципиальная возможность использования полукокса в составе углеродной части шихты в качестве базового восстановителя для производства ферросиликомарганца. Отмечено, что новый восстановитель в чистом виде работает хуже, чем в смеси с углем. Показано, что наибольший синергетический эффект при производстве ферросиликомарганца достигнут при работе полукокса вместе с углем, при этом достигнуты максимальная производительность печи 43 т/сутки, максимальный коэффициент извлечения 87,9 %, минимальное удельное образование пыли 49 кг/т сплава. Выявлено, что при производстве ферросилиция использование нового восстановителя не дало существенного положительного эффекта, в том числе из-за его низкой структурной прочности. Отмечено, что на производительность печи влияют структура и вид восстановителя: при использовании в шихте восстановителя с более высокой реакционной способностью возможно получение более высоких производственных показателей печи. При производстве ферросилиция изменение удельного пылеобразования тесно связано с уровнем суточного производства и удельным расходом электроэнергии и может служить индикатором работы печи. Производительность печи при прочих равных условиях определяется величиной вводимой полезной мощности. При избытке углерода в шихте увеличение полезной мощности приводит к незначительному увеличению производительности печи, но при этом существенно увеличивается расход электроэнергии и удельное пылеобразование. Влияние технологических факторов на технико-экономические показатели плавки определяется степенью посадки электродов в печи.

Ключевые слова: полукокс, твердый углеродистый восстановитель, ферросилиций, ферросиликомарганец, ферросплавное производство, технологические свойства, реакционная способность, применение в металлургии.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-521-528

ВВЕДЕНИЕ

Производство ферросплавов является одним из важнейших элементов металлургического производства Кузбасса. Однако в настоящее время наблюдается острая нехватка основного восстановителя, применяемого в металлургических процессах, – кокса из дефицитных спекающихся каменных углей. В связи с этим ведутся активные поиски новых перспективных углеродистых материалов, которые способны полностью или частично заменить каменноугольный кокс в различных металлургических процессах, в том числе в производстве ферросплавов [1 – 5].

Углеродистый материал, применяемый в качестве твердого восстановителя при выплавке кремния, а также ферросплавов высокочистых сортов, должен обладать развитой пористой структурой, высокой реакционной способностью и электросопротивлением, достаточной механической прочностью и минимальной зольностью. Опыт промышленного производства металлургического кремния различных марок показывает, что такими свойствами обладают древесный уголь, нефтяной кокс, некоторые сорта малозольного каменного угля, древесная щепа. Однако стоит отметить, что требованиям, предъявляемым к твердому восстановителю, полностью не удовлетворяет ни один из назван-

ных материалов. Только использование их в различных комбинациях позволяет создать благоприятные условия для эффективного протекания процессов восстановления в электропечи [6 – 19].

По качественным показателям и величине запасов добываемого угля Кузнецкий бассейн является наиболее перспективной угольной базой страны. Особое место в Кузнецком угольном бассейне занимают длиннопламенные угли. Их малая зольность, возможность добычи открытым способом, мощность пластов, чистота по сере и фосфору, близость бассейна к промышленным предприятиям послужили причиной изыскания экономически выгодных способов переработки их в сырье с получением специальных видов кокса [20 – 22].

Целью настоящей работы является оценка технологической пригодности полукокса в качестве углеродистого восстановителя при производстве марганцевых и кремнистых сплавов.

В качестве исходного сырья использовали длиннопламенные угли месторождений Кузбасса. Исследованы следующие образцы углей: 1 – уголь с ООО «Разрез «Талдинский-Западный»; 2 – уголь с ООО «Разрез им. В.И. Черемнова»; 3 – уголь с АО «Разрез «Инской». В настоящей работе представлены результаты апробации полученного полукокса как углеродистого восстановителя при производстве марганцевых и кремнистых сплавов.

ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛУКОКСА

Опытно-промышленная партия (около 200 т) полукокса была получена на опытной установке в Новосибирске. По технологической схеме производства полукокса обогащенный уголь загружается в электрокальцинатор, где происходит предварительный разогрев сырого материала до 700 °С и последующий резистивный нагрев до 900 – 1200 °С путем пропускания тока между верхним и нижним электродами непосредственно через плотный слой угля. Характеристики полученного полукокса: содержание серы 0,18 %, влаги 7,15 %, золы 4,47 %, углерода 96,3 % (по массе); содержание летучих 2,97 %; реакционная способность (CRI) 183,4; удельное электрическое сопротивление 4,404 мОм·м.

При проведении опытной кампании были поставлены следующие цели: определить эффективность применения нового полукокса как восстановителя по сравнению с принятой технологией производства ферросиликомарганца и ферросилиция на предприятии ООО «Западно-Сибирский электрометаллургический завод» (ООО «ЗСЭМЗ»); определить оптимальный состав восстановительной смеси; проанализировать технико-экономические показатели, полученные в ходе работы с применением нового полукокса для производства ферросиликомарганца и ферросилиция на ООО «ЗСЭМЗ».

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЛАВКИ ФЕРРОСИЛИКОМАРГАНЦА С ПРИМЕНЕНИЕМ НОВОГО ВОССТАНОВИТЕЛЯ

Была проведена опытная кампания выплавки ферросиликомарганца с применением полученного высококорреакционного восстановителя. Выплавку проводили в печи РКО-12. На рис. 1 представлены зависимости производительности, удельного пылеобразования, фактической мощности и удельного расхода электроэнергии от состава шихты в различные периоды плавки.

Работу печи можно разделить на три периода:

- переходный период (П): восстановитель – уголь;
- период I: восстановитель – уголь + полученный полукокс;
- период II: восстановитель – чистый полукокс.

Рис. 1. Зависимость производительности печи (а), пылеобразования (б), фактической мощности (в) и удельного расхода электроэнергии (г) от состава шихты в различные периоды плавки

Fig. 1. Dependence of the furnace performance (а), dust formation (б), actual power (в) and specific energy consumption (г) on charge composition in different periods of smelting

В предопытный период (3 дня) печь работала с избытком углерода, длина электродов составляла 1,3 м. Отсутствие необходимой глубины посадки электродов привело к существенному (250 кг/т сплава) пылеобразованию (рис. 1, б), а также к низкой производительности (в среднем 24,3 т/сут).

Переходный период

При подаче нового восстановителя была скорректирована общая навеска углерода на недостаток в шихте с целью обеспечения более глубокой посадки электродов. Печь достаточно быстро отреагировала на введение в шихту нового восстановителя. Посадка электродов увеличилась (1,6 м), производительность печи возросла с 24,3 до 26,8 т/сут.

Следует отметить существенное влияние нового восстановителя на горение дуг: работа дуги более ровная, меньше скачки токовой нагрузки. Это привело к существенному уменьшению пылеобразования: удельное пылеобразование снизилось с 250, 0 до 80,6 кг/т сплава (рис. 1, б).

При коэффициенте извлечения марганца 0,454 (соотношение общего количества углерода к количеству марганца в шихте), несмотря на дефицит углерода, содержание марганца находится на достаточно высоком (71,5 %) уровне благодаря уменьшению потерь марганца с выносом пыли (рис. 1, б, табл. 1)

Период I

На этапе I было увеличено количество углерода в шихте (отношение количества углерода в шихте к количеству марганца в шихте 0,535) в основном за счет углерода нового восстановителя.

Посадка электродов не изменилась, производительность печи составила 41 – 43 т/сут, удельное образование пыли снизилось до 49 кг/т сплава. Извлечение марганца повысилось с 71,5 до 87,9 % (табл. 1),

при этом печь работала также с недостатком углерода.

Период II

Опробована работа печи на чистом восстановителе (без добавления угля). Работа печи в данном периоде представлена двумя интервалами.

Количество углерода на 1 т марганца увеличили с 535 до 564 кг, в результате снизились потери марганца со шлаком с 11,57 до 8,43 %. Однако некоторый переизбыток восстановителя ухудшил посадку печи, что привело к снижению производительности с 43,0 до 36,2 т/сут, увеличению пылеобразования до 60 кг/т сплава и уменьшению содержания марганца с 87,9 до 81,9 %. Этот период отмечен как самый нестабильный.

После вывода восстановителя из состава шихты в интервале I средняя производительность печи составила 34,5 т/сут, вынос пыли 140 кг/т сплава, посадка электродов ухудшилась. Ход печи следует охарактеризовать как переходный: по-видимому, остаточная часть восстановителя из периферийных зон печи постепенно перешла в зону плавления.

Далее (интервал 2) печь вернулась в исходное состояние: производительность печи снизилась до 27 т/сут, удельный вынос пыли возрос до 234 кг/т сплава.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЛАВКИ ФЕРРОСИЛИЦИЯ

С ПРИМЕНЕНИЕМ НОВОГО ВОССТАНОВИТЕЛЯ

Была проведена опытная кампания выплавки ферросилиция с применением полученного высокореакционного восстановителя. Выплавку проводили в печи РКО-14.

Были выбраны периоды работы печи:

- базовый: восстановитель – кокс/полукокс;
- опытный период:

• опытный этап I: восстановитель – кокс + полученный полукокс;

Т а б л и ц а 1

Технологические параметры плавки ферросиликомарганца по периодам

Table 1. Technological parameters of smelting ferrosilicon manganese by periods

Период	Mn, %		C _{общ} , %	$\frac{C_{\text{общ}}}{Mn_{\text{шихт}}}$	$\frac{C_{\text{уголь}}}{Mn_{\text{шихт}}}$	$\frac{C_{\text{полукокс}}}{Mn_{\text{шихт}}}$	α , %
	в руде	в шихте					
Переходный	32,6	26,0	11,8	0,454	0,214	0,240	0,715
I	33,6	66,4	35,5	0,535	0,081	0,455	0,879
II	34,3	61,7	34,8	0,564	0	0,546	0,819

П р и м е ч а н и е. $\frac{C_{\text{общ}}}{Mn_{\text{шихт}}}$, $\frac{C_{\text{уголь}}}{Mn_{\text{шихт}}}$, $\frac{C_{\text{полукокс}}}{Mn_{\text{шихт}}}$ – отношение общего количества углерода в шихте, количества углерода в угле, количества углерода в полукоксе к количеству марганца в шихте соответственно; α – расчетный коэффициент извлечения марганца; C_{общ} – общее количество углерода в шихте.

Т а б л и ц а 2

Удельные расходы материалов в различные периоды плавки

Table 2. Specific consumption of materials at different periods of smelting

Период	Расход, т/т металла					
	Руда	Уголь (Т)	Шлак оборотный	Полукокс	Кварцит	Антрацит
Предопытный	2,064	0,658	0,223	0	0,485	0
Переходный	2,933	0,284	0,270	0,251	0,600	0
<i>I</i>	2,298	0,088	0,199	0,389	0,510	0
<i>II</i>	2,375	0	0	0,517	0,497	0
Интервал <i>I</i>	2,147	0,234	0,213	0	0,287	0,247
Интервал 2	2,546	0,214	0,266	0	0,315	0,292

Т а б л и ц а 3

Основные (среднесуточные) производственные показатели работы печи РКО-14

Table 3. Key (daily average) performance indicators of the furnace RKO-14

Среднее и общее значения по периодам	Производство, факт. т		Съем электроэнергии, МВт/ч	Факт. мощность, МВт	Количество уловленной пыли, т	Температура под зонтом печи, °С	Температура на фильтрах газоочистки, °С
	физ. т	баз. т					
базовый период							
среднее	25,26	25,87	202,0	8,46	6,86	200	156
всего	277,84	284,6	2221,8	—	75,48	—	—
этап 1 опытного периода							
среднее	25,04	25,56	198,0	8,33	6,33	175,3	134,9
всего	425,75	434,57	3356,8	—	107,67	—	—
этап 2 опытного периода							
среднее	25,44	26,03	202,9	8,49	5,49	206	147
всего	101,76	104,1	811,5	—	21,97	—	—

• опытный этап 2: восстановитель – полученный полукокс.

В табл. 3 – 5 представлены основные (среднесуточные и удельные) производственные показатели работы печи и расход сырья по периодам.

На рис. 2 представлена зависимость количества произведенного ферросилиция от фактической мощности при работе печи в базовый период и этап *I* опытного периода.

На рис. 3 представлены зависимости удельного пылеобразования и удельного расхода электроэнергии в разные периоды плавки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Производство ферросиликомарганца с применением нового восстановителя

Мощность печи определяется в основном качеством восстановителя и ресурсом эвакуации газов из-под

зонта. Работа с новым восстановителем позволила увеличить активную мощность с 5,23 до 7,00 – 7,25 МВт (рис. 1, в) без видимого задымления рабочей площадки.

Увеличение мощности печи, безусловно, приводит к повышению ее производительности, однако при прочих равных условиях более существенным фактором следует считать скорость реакции восстановителя, то есть вид и комбинацию по составу восстановителей в шихте плавки. Действительно, при работе печи в периодах *I* и *II* при одинаковой мощности при применении нового восстановителя вместе с углем производительность печи увеличивается в 1,16 раза.

Минимальный удельный расход электроэнергии зафиксирован при использовании полученного полукокса вместе с углем марки «Т». Следует отметить, что использование нового восстановителя в любых комбинациях влияет на снижение удельного расхода электроэнергии более существенно, чем при использовании стандартного восстановителя (рис. 1, г).

Удельные показатели работы печи РКО-14

Table 4. Specific operation indicators of the furnace RKO-14

Период	Расход электро-энергии, кВт/ч	Количество уловленной пыли, кг/т	Расход сырья, т					
			Кварцит КРАДМС	Коксовый орешек	Полукокс П-2	Стальная стружка	Щепа древесная	Новый полукокс
Базовый	7807	265	1549,1	314,4	575	287,1	199,4	0
Этап 1 опытного периода	7745	248	1600,8	265,2	0	302,6	0	488,7
Этап 2 опытного периода	7795	211	1613,9	0	0	346,1	0	756,8

Расход сырья при работе печи РКО-14

Table 5. Raw material consumption during operation of the furnace RKO-14

Период	Расход сырья, т					
	Кварцит КРАДМС	Коксовый орешек	Полукокс П-2	Стальная стружка	Щепа древесная	Новый полукокс
базовый	453,692	89,491	163,638	81,709	56,749	0
Этап 1 опытного периода	695,650	115,23	0	131,509	0	212,375
Этап 2 опытного периода	168,014	0	0	36,025	0	78,783

Наилучшие показатели плавки получены при комплексном применении нового восстановителя и угля при $\frac{C_{\text{полукокс}}}{Mn_{\text{шихт}}} = 0,455$ и $\frac{C_{\text{уголь}}}{Mn_{\text{шихт}}} = 0,081$ (табл. 1). Удельные расходы материалов на тонну металла при этом составляют: 0,389 т нового восстановителя и 0,088 т угля (табл. 2).

Таким образом, можно отметить характерные особенности применения нового восстановителя в шихте

при плавке ферросиликомарганца: способствует более глубокой посадке электродов; стабилизирует процесс горения дуги; существенно снижает пылеобразование и тем самым снижает потери марганца с пылью; в чистом виде работает хуже, чем в смеси с углем; наибольший синергетический эффект достигнут при работе его вместе с углем, при этом достигнуты максимальная производительность печи (43 т/сут), максимальное извлечение (87,9 %), минимальное удельное образование пыли (49 кг/т сплава).

Производство ферросилиция**с применением нового восстановителя**

При введении в состав шихты нового полукокса (этап 1 опытного периода) снижается удельный расход электроэнергии за счет увеличения сопротивления шихты вследствие изменения структуры углеродсодержащего материала (рис. 3, б), при этом обеспечивается более глубокая посадка электродов. Глубина посадки электродов оказывает влияние на пылеобразование: глубокая посадка электродов обеспечивает минимальное пылеобразование. При работе печи с глубокой посадкой электродов (этап 1 опытного периода) достигнуто снижение удельного пылеобразования в среднем с 270 до 230 кг/сут (рис. 3, а). Производительность печи напрямую зависит от вводимой мощности (рис. 2). Производительность печи, работающей на шихте, в состав которой входит полученный полукокс, возрастает

Рис. 2. Зависимость количества произведенного ферросилиция от фактической мощности при работе печи в базовый период (1) и этап I опытного периода (2)

Fig. 2. Dependence of the amount of produced ferrosilicon on actual power during furnace operation in the base period (1) and stage I of the experimental period (2)

Рис. 3. Удельное пылеобразование (а) и удельный расход электроэнергии (б) в разные периоды плавки

Fig. 3. Specific dust formation (a) and specific energy consumption (b) at different periods of smelting

незначительно по сравнению с производительностью печи, работающей на стандартном восстановителе.

На этапе 2 опытного периода наблюдали нестабильную работу печи (рис. 3).

Таким образом можно сделать следующие выводы: производительность печи при прочих равных условиях определяется величиной вводимой мощности; при избытке углерода в шихте увеличение полезной мощности приводит к незначительному увеличению производительности печи, но при этом существенно увеличивается расход электроэнергии и удельное пылеобразование; изменение величины удельного пылеобразования тесно связано с уровнем суточного производства и удельного расхода электроэнергии и может служить индикатором работы печи; влияние технологических факторов на технико-экономические показатели плавки определяется степенью посадки электродов в печи; на производительность печи влияет структура и вид восстановителя: при использовании в шихте восстановителя с более высокой реакционной способностью (полукокс П-2 и полученный спецкокс) возможно получить более высокие производственные показатели печи.

Достигнуть высокой производительности печи и минимального пылеобразования не удалось. При работе

с новым полукоксом производственные показатели работы печи соответствуют показателям работы печи на полукоксе П-2. Применение нового восстановителя позволяет незначительно снизить пылеобразование. Из-за низкой структурной прочности в процессе транспортировки и дозирования нового полукокса отмечено значительное его измельчение.

Выводы

Установлена принципиальная возможность использования полученного полукокса в составе углеродной части шихты в качестве базового восстановителя для производства ферросиликомарганца. Наибольший синергетический эффект при производстве ферросиликомарганца достигнут при работе полученного полукокса вместе с углем, при этом достигнуты максимальная производительность печи 43 т/сут, максимальное извлечение 87,9 %, минимальное удельное пылеобразование 49 кг/т сплава.

Выявлено, что при производстве ферросилиция использование нового восстановителя не дало существенного положительного эффекта (из-за его низкой структурной прочности). При производстве ферросилиция

изменение величины удельного пылеобразования тесно связано с уровнем суточного производства и удельного расхода электроэнергии и может служить индикатором работы печи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Галевский Г.В., Аникин А.Е., Руднева В.В., Галевский С.Г. Применение буроугольных полукоков в металлургии: технологическая и экономическая оценка // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2016. № (2) 243. С. 114 – 123.
2. Рябов В.А., Столбова О.Б. Современный промышленный комплекс Кемеровской области // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Биологические, технические науки и науки о Земле. 2017. № 3. С. 41 – 46.
3. Страхов В.М. Проблемы с углеродистыми материалами для рудной и химической электротермии и пути их решения // Кокс и химия. 2010. № 8. С. 29 – 33.
4. Luo Y.H., Zhu D.Q., Pan J., Zhou X.L. Utilization of semi-coke as by-product derived from coal-based direct reduction process in iron ore sintering // Ironmaking & Steelmaking. 2016. Vol. 43. No. 8. P. 628 – 634.
5. Pistorius P.C. Reductant selection in ferroalloy production: The case for the importance of dissolution in the metal // Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 2002. Vol. 102. No. 1. P. 33 – 36.
6. Koursaris A., See J.B. Reactions in the production of high-carbon ferromanganese from Mamatwan ore // Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 1979. Vol. 79. P. 149 – 158.
7. Cheng A. Coke quality requirements for blast furnaces. Part I // Iron and Steelmaker. 2001. Vol. 28. No. 1. P. 30 – 32.
8. Ishii K. Preface to the special issue on «Innovative ironmaking reactions in new BF to aim at halving energy needs and minimizing environmental load» // ISIJ International. 2004. Vol. 44. No. 12. P. 1969 – 2178.
9. Ishii K., Yagi J. Basic research on ironmaking process in blast furnace and development in near future // Tetsu-to-Hagane. 2001. Vol. 87. No. 5. P. 207 – 220.
10. Khanna R., Sahajwalla V., Rodgers B., McCarthy F. Dissolution of carbon from alumina-carbon mixtures into liquid iron: influence of carbonaceous material // Metallurgical and Materials Transactions B. 2006. Vol. 37. No. 4. P. 623 – 632.
11. Gudenau H.W., Meier L., Schemmann V. Coke quality requirements for modern blast furnace operation. – In book: Ironmaking conference proceedings, 1998. P. 1067 – 1072.
12. Ким В.А., Ульева Г.А. Сравнительная оценка структуры спеккоксов, используемых в электротермии // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2012. № 2. С. 20 – 23.
13. Страхов В.М., Суровцева И.В., Елкин Д.К., Елкин К.С., Черевко А.Е. Анализ качества и перспективы использования малозольных углеродистых восстановителей для электротермического производства технического кремния // Кокс и химия. 2012. № 5. С. 18 – 21.
14. Страхов В.М. Альтернативные углеродистые восстановители для ферросплавных производств // Кокс и химия. 2009. № 1. С. 20 – 25.
15. Нефедов П.Я. О требованиях к качеству углеродистых восстановителей для процессов рудной электротермии // Кокс и химия. 2000. № 8. С. 24 – 32.
16. Dijs H.M., Smith D.J. Factors affecting the resistivity and reactivity of carbonaceous reducing agents for the electric-smelting industry // Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 1980. P. 286 – 296.
17. Feng B., Bhatia S.K., Barry J.C. Structural ordering of coal char during heat treatment and its impact on reactivity // Carbon. 2002. Vol. 40. No. 4. P. 481 – 496.
18. Soundara Rajan M., Somu M., Ganapathik, Malarkkan K.M.V. Thermal analysis-approach to coal reactivity studies // Indian Journal of Power and River Valley Development. 1980. Vol. 30. No. 11-12. P. 148 – 162.
19. Miura S., Silveston P.L. Change of pore properties during carbonization of coking coal // Carbon. 1980. Vol. 18. No. 2. P. 93 – 108.
20. Голицын М.В., Вялов В.И., Богомолов А.Х., Пронина Н.В., Макарова Е.Ю., Митронов Д.В., Кузванова Е.В., Макаров Д.В. Перспективы развития технологического использования углей в России // Георесурсы. 2015. Т. 61. № 2. С. 41 – 53.
21. Угольная база России. Т. II. Угольные бассейны и месторождения Западной Сибири (Кузнецкий, Горловский, Западно-Сибирский, бассейны; месторождения Алтайского края и Республики Алтай). – М.: ООО «Геоинформцентр», 2003. – 604 с.
22. Минерально-сырьевая база угольной промышленности России: в 2 т. Т. 1. Состояние, динамика, развитие / Н.Н. Балмасов, В.К. Бранчуглов, М.В. Быкадоров и др.; под ред. А.Е. Евтушенко, Ю.Н. Малышева. – М.: изд. Московского государственного горного университета, 1999. – 648 с.

Поступила в редакцию 27 января 2020 г.
После доработки 25 февраля 2020 г.
Принята к публикации 13 марта 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 7, pp. 521–528.

TECHNOLOGICAL SUITABILITY OF SEMI-COKE AS A CARBON REDUCER IN PRODUCTION OF MANGANESE AND SILICON ALLOYS

A.A. Shubina¹, N.V. Zhuravleva^{1,2}, S.G. Korotkov²,
P.P. Lazarevskii³, Yu.E. Romanenko³

¹ Joint Stock Company “West Siberian Testing Center”, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, Russia

² Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, Russia

³ LLC “Regionstroj”, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, Russia

Abstract. The article presents results of testing semi-coke as a carbon reducing agent in the production of manganese and silicon alloys. The fundamental possibility of using semi-coke in carbon part of the charge as a basic reducing agent for the production of ferrosilicon manganese is established. It is noted that the new reducing agent in its pure form

works worse than in the mixture with coal. The greatest synergistic effect in the production of ferrosilicon manganese was achieved during the interaction of semi-coke with coal, while the following indicators were obtained: maximum furnace productivity of 43 t/day, maximum extraction coefficient of 87.9 %, and minimum specific dust formation of 49 kg/t of alloy. In the production of ferrosilicon the use of a new reducing agent did not give a significant positive effect, due to its low structural strength. It was revealed that the structure and type of the reducing agent affect the furnace performance: when using a reducing agent with a higher reactivity in the charge, it is possible to obtain higher furnace performance. In the production of ferrosilicon, a change in the specific dust generation is closely related to the level of daily production and specific energy consumption and can serve as an indicator of the furnace operation. The furnace performance, ceteris paribus, is determined by the amount of useful power input. With an

excess of carbon in the charge an increase in useful power leads to a slight increase in the furnace performance, but at the same time, the energy consumption and specific dust formation significantly increase. It is shown, that the influence of technological factors on the technical and economic indicators of melting is determined by the degree of electrode seating in the furnace.

Keywords: semi-coke, solid carbonaceous reducing agent, ferrosilicon, ferrosilicon manganese, ferroalloy production, technological properties, reactivity, application in metallurgy.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-521-528

REFERENCES

- Galevskii G.V., Anikin A.E., Rudneva V.V., Galevskii S.G. The use of lignite semi-coke in metallurgy: technological and economic assessment. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*. 2016, no. 2 (243), pp. 114–123. (In Russ.).
- Ryabov V.A., Stolbova O.B. Modern industrial complex of Kemerovo region. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Biologicheskie, tekhnicheskie nauki i nauki o Zemle*. 2017, no. 3, pp. 41–46. (In Russ.).
- Strakhov V.M. Problems with carbon materials in ore and chemical electrofurnaces. *Coke and Chemistry*. 2010, vol. 53, no. 8, pp. 301–304.
- Luo Y.H., Zhu D.Q., Pan J., Zhou X.L. Utilisation of semi-coke as by-product derived from coal-based direct reduction process in iron ore sintering. *Ironmaking & Steelmaking*. 2016, vol. 43, no. 8, pp. 628–634.
- Pistorius P.C. Reductant selection in ferroalloy production: The case for the importance of dissolution in the metal. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2002, vol. 102, no. 1, pp. 33–36.
- Koursaris A., See J.B. Reactions in the production of high-carbon ferromanganese from Mamatwan ore. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 1979, vol. 79, pp. 149–158.
- Cheng A. Coke quality requirements for blast furnaces. Part I. *Iron and Steelmaker*. 2001, vol. 28, no. 1, pp. 30–32.
- Ishii K. Preface to the special issue on innovative ironmaking reactions in new BF to aim at halving energy needs and minimizing environmental load. *ISIJ International*. 2004, vol. 44, no. 12, pp. 1969–2178.
- Ishii K., Yagi J. Basic research on ironmaking process in blast furnace and development in near future. *Tetsu-to-Hagane*. 2001, vol. 87, no. 5, pp. 207–220.
- Khanna R., Sahajwalla V., Rodgers B., McCarthy F. Dissolution of carbon from alumina-carbon mixtures into liquid iron: influence of carbonaceous material. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2006, vol. 37, no. 4, pp. 623–632.
- Gudenau H.W., Meier L., Schemmann V. Coke quality requirements for modern blast furnace operation. In: *Ironmaking Conference Proceedings*. 1998, pp. 1067–1072.
- Kim V.A., Ul'eva G.A. Comparative evaluation of the structure of special cokes used in electrothermics. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. 2012, no. 2, pp. 20–23. (In Russ.).
- Strakhov V.M., Surovtseva I.V., Elkin D.K., Elkin K.S., Cherevko A.E. Low-ash carbon reducing agents for electrothermal silicon production. *Coke and Chemistry*. 2012, vol. 55, no. 5, pp. 172–175.
- Strakhov V.M. Alternative carbon reducing agents for ferroalloy production. *Coke and Chemistry*. 2009, vol. 52, no. 1, pp. 19–22.
- Nefedov P.Ya. On the quality requirements of carbonaceous reducing agents for ore electrothermy. *Koks i khimiya*. 2000, no. 8, pp. 24–32. (In Russ.).
- Dijs H.M., Smith D.J. Factors affecting the resistivity and reactivity of carbonaceous reducing agents for the electric-smelting industry. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 1980, pp. 286–296.
- Feng B., Bhatia S.K., Barry J.C. Structural ordering of coal char during heat treatment and its impact on reactivity. *Carbon*. 2002, vol. 40, no. 4, pp. 481–496.
- Soundara R.M., Somu M., Ganapathik, Malarkkan K.M.V. Thermal analysis-approach to coal reactivity studies. *Indian Journal of Power and River Valley Development*. 1980, vol. 30, no. 11–12, pp. 148–162.
- Miura S., Silveston P.L. Change of pore properties during carbonization of coking coal. *Carbon*. 1980, vol. 18, no. 2, pp. 93–108.
- Golitsyn M.V., Vyalov V.I., Bogomolov A.Kh., Pronina N.V., Makarova E.Yu., Mitronov D.V., Kuzevanova E.V., Makarov D.V. Prospects for technological use of coals in Russia. *Geosursy*. 2015, vol. 61, no. 2, pp. 41–53. (In Russ.).
- Ugol'naya baza Rossii. Tom II. Ugol'nye basseiny i mestorozhdeniya Zapadnoi Sibiri (Kuznetskii, Gorlovskii, Zapadno-Sibirskii basseiny; mestorozhdeniya Altaiskogo kraya i Respubliki Altai)* [Coal base of Russia. Vol. II. Coal basins and deposits of Western Siberia (Kuznetsk, Gorlovskiy, West Siberian basins; deposits of the Altai Territory and the Altai Republic)]. Moscow: OOO "Geoinformtsentr", 2003, 604 p. (In Russ.).
- Balmasov N.N., Branchugov V.K., Bykadorov M.V. etc. *Mineral'no-syr'evaya baza ugol'noi promyshlennosti Rossii: v 2 t. T. 1. Sostoyaniye, dinamika, razvitiye* [Mineral resources base of the coal industry of Russia: in 2 vols. Vol. 1. State, dynamics, development]. Evtushenko A.E., Malyshev Yu.N. eds. Moscow: izd. Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 1999, 648 p. (In Russ.).

Information about the authors:

A.A. Shubina, Engineer of the Department of Chromatography, Ecology and Petroleum Products (osokina.alina@inbox.ru)
N.V. Zhuravleva, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Power and Ecology", General Director (zhuravleva_nv@zsfic.ru)
S.G. Korotkov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Power and Ecology" (kafedra-TEE@yandex.ru)
P.P. Lazarevskii, Cand. Sci. (Eng.), Chief Specialist of the Technological Department (lazarevskiy_pp@sgmk-group.ru)
Yu.E. Romanenko, Cand. Sci. (Eng.), Leading Specialist of the Technological Department (romanenko_ye@sgmk-group.ru)

Received January 27, 2020
 Revised February 25, 2020
 Accepted March 13, 2020