НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ БЕСКОКСОВОГО ПРОИЗВОДСТВА КРЕМНИСТЫХ ФЕРРОСПЛАВОВ

*В. М. СТРАХОВ*¹, канд. техн. наук, заведующий лабораторией, vmstrahov@mail.ru;
*И. М. КАШЛЕВ*², канд. техн. наук, главный специалист технического управления;
*М. А. СОЛОВЬЕВ*², главный специалист технического управления;
*А. Г. КАЛИАКПАРОВ*³, д-р техн. наук, заведующий лабораторией “Металлургия и теплотехника”
 (¹ ОП “Кузнецкий центр” АО ВУХИИ, Россия, г. Новокузнецк;
² АО “Кузнецкие ферросплавы”, Россия, г. Новокузнецк;
³ ТОО “Научно-исследовательский инженеринговый центр ENRC”, Казахстан, г. Астана)

Аннотация. Одним из перспективных направлений достижения высокоэффективного производства кремнистых ферросплавов является использование в качестве углеродистых восстановителей каменных углей вместо кокса. Представлены результаты промышленных испытаний замены при выплавке энергоемкого ферросилиция ФС75 дорогостоящего кокса длиннопламенными и бурными углями. Опытные кампании проведены на трех ферросплавных предприятиях России и Казахстана. Использовались длиннопламенные угли Шубаркольского месторождения, Казахстан, бурные угли Кайчакского разреза, Кузбасс, и Майкюбенского месторождения, Казахстан. Угли имеют зольность A^d на уровне 3–11 %, высокие показатели реакционной способности и удельного электросопротивления, повышенный выход летучих веществ ($V^{daf} = 42\text{--}46\%$) с содержанием восстановительных компонентов (CO, H_2) до $180\text{--}215\text{ м}^3/\text{т}$ (против $11\text{ м}^3/\text{т}$ у кокса). На предприятии “А” в результате промышленных опытов достигнут уровень замены кокса 88–99 % при использовании смеси, кг/колошу: 20 уголь Б, 165–190 уголь Д и 35–60 древесная щепа. Достигнуты удовлетворительные технико-экономические показатели производства ферросилиция ФС75. Ввиду высокого выхода летучих веществ углей марок Д и Б ($V^{daf} = 44\text{--}46\%$) наблюдалась повышенная температура отходящих газов под зонтом (до $240\text{--}270\text{ }^\circ\text{C}$) и на газоочистке (до $160\text{--}170\text{ }^\circ\text{C}$). На предприятии “В” при выплавке ФС75 в шихте на постоянной основе используется длиннопламенный уголь с заменой кокса на 84 %. На заводе ферросплавов “С”, Казахстан, установлена технологическая возможность полной (100 %) замены кокса длиннопламенным углем. Для перехода на бескоксовое производство кремнистых ферросплавов с использованием низкометаморфизованных углей марок Д и Б при обеспечении высоких технико-экономических показателей необходимо внесение существенных изменений в действующий режим эксплуатации ферросплавных печей. Другим вариантом является строительство новых печей, адаптированных к повышенной температуре отходящих газов, образующихся при пиролизе углей с высоким выходом летучих веществ.

Ключевые слова: ферросплавное производство, производство ферросилиция, рудно-термическая печь, альтернативные виды углеродистых восстановителей, длиннопламенные и бурные угли, коэффициент замены кокса.

Ссылка для цитирования. Страхов В.М., Кашлев И.М., Соловьев М.А., Калиакпаров А.Г. Научные и практические основы бескоксового производства кремнистых ферросплавов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 4. С. 465–479.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-4-465-479

SCIENTIFIC AND PRACTICAL FUNDAMENTALS OF COKELESS PRODUCTION OF SILICEOUS FERROALLOYS

*V. M. STRAKHOV*¹, PhD (Tech), Head of Lab., vmstrahov@mail.ru;
*I. M. KASHLEV*², PhD (Tech), chief technical officer;
*M. A. SOLOV'EV*², chief technical officer;
*A. G. KALIAPAROV*³, HD (Tech), Head of Lab. “Metallurgy and heat engineering”
 (¹ OP “Kuznetsky Center”, JSC VUKHIN, Russia, Novokuznetsk;
² JSC “Kuznetskiye ferrosplavy”, Russia, Novokuznetsk;
³ Research Engineering Center ENRC Ltd, Kazakhstan, Astana)

Abstract. Application of mineral carbon as carbonaceous reducing agents instead of coke for siliceous ferroalloys smelting is one of perspective ways of high efficient production of them. Results of industrial tests of expensive coke substitution by long-flame and brown coals during smelting of power-intensive ФС75 ferrosilicon presented. Tests were carried out at three ferroalloys plants of Russia and Kazakhstan. The following coals were used: long-flame coals of Shubarkol'skoe deposit (Kazakhstan), brown coals of Kajchasky open-pit mine (Kuzbass) and Majkyubenskoye deposit (Kazakhstan). The coals have A^d ash content at the level of 3–11%, high indices of reaction ability and specific electrical resistance, increased yield of volatile substances ($V^{daf} = 42\text{--}46\%$) and content of reducing components (CO, H_2) up to $180\text{--}215\text{ м}^3/\text{t}$ (comparing with $11\text{ м}^3/\text{t}$ in coke). At the plant “А” the industrial tests resulted in coke substitution by 88–99% with the mixture, kg/charge: 20 – coal Б, 165–190 – coal Д and 35–60 – wood chips. Satisfactory

technical and economic indices of ΦC75 ferrosilicon production reached. Because of the volatile substances high yield of D and B coals ($V^{\text{daf}} = 44\text{--}46\%$), an increased temperature of emitted gases (up to $240\text{--}270^\circ\text{C}$) under the hood observed and at the gas-cleaning system (up to $160\text{--}170^\circ\text{C}$). At the plant “B” during ΦC75 smelting, the long-flame coal was used constantly to substitute the coke by 84%. At the plant “C”, Kazakhstan, a technological possibility of complete (100%) coke substitution by long flame coal determined. To transfer to cokeless production of siliceous ferroalloys with application of low metamorphized coals of D and B grades it is necessary to make considerable changes in existing mode of ferroalloys furnaces running to provide high technical and economic indices of the production. Another variant means construction of new furnaces, adapted to increased temperature of emitted gases, forming at the coals pyrolysis with high yield of volatile substances.

Key words: ferroalloys production, production of ferrosilicon, ore-thermal furnace, alternative kinds of carbonaceous reducing agents, long-flame and brown coals, coke substitution coefficient.

For citation. Strakhov V.M., Kashlev I.M., Solov'ev M.A., Kaliakparov A.G. Scientific and practical fundamentals of cokeless production of siliceous ferroalloys. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 4, pp. 465–479. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-4-465-479

Решение проблемы высокоэффективного производства кремнистых ферросплавов в значительной мере связано с подбором качественного углеродистого восстановителя. В последнее время особый интерес ферросплавщики проявляют к технологии с заменой дорогостоящего кокса энергетическими углями. Такая технология очень привлекательна, так как не требует капитальных затрат, а уголь имеет ряд благоприятных свойств и существенно дешевле кокса. Поэтому использование каменных углей является одним из перспективных направлений разработки альтернативных видов углеродистых восстановителей для ферросплавного производства [1–6].

Следует отметить, что кокс является искусственно созданным углеродистым материалом, технология производства которого отработывалась и шлифовалась исключительно для удовлетворения требований доменного производства. Эти требования не всегда совпадают (а порой диаметрально противоположны) с требованиями ферросплавного производства [1, 7–12]. Тем не менее отсеvy валового кокса класса 25–10 мм (коксый орешек) являются основным углеродистым восстановителем. Поэтому в ферросплавной отрасли закономерно возникла необходимость замены дорогостоящего и неответчающего технологическим требованиям кокса на другие углеродистые восстановители. К ним прежде всего относятся каменные угли.

В отличие от кокса уголь создан по “природной технологии”, не связанной с каким-либо производством, и имеет ряд специфических свойств. Угли обладают широким диапазоном вещественного и минерального состава, физико-химических и термомеханических свойств, пористой структурой, различным поведением при высокотемпературном нагревании. Без знания этих свойств углей и условий их формирования нельзя достичь максимального успеха при их использовании в производстве ферросплавов разных технологических марок.

В настоящее время в России выбор углей для ферросплавного производства рекомендуется осуществлять в соответствии с ГОСТ Р 51588–

2000 “Угли каменные и антрациты Кузнецкого и Горловского бассейнов для технологических целей”. При этом в табл. 4 ГОСТа указывается, что взамен кокса должны использоваться угли тощие (Т), антрациты (А) и слабоспекающиеся (СС), обогащенные и необогащенные. Для них регламентированы следующие общие требования к качеству: крупность — 25–50 или 50–13 мм, зольность A^d — 10–14 %, влажность W_t^r — 5–10 %, содержание мелочи (менее нижнего предела) — 20 % (табл. 1). К сожалению, именно этими показателями ограничиваются требования к углям для ферросплавного производства. При этом диапазон значений нормируемых показателей не позволяет в полной мере использовать широкие возможности угольной сырьевой базы для ферросплавной технологии. Но самое главное, перечисленные требования совершенно не отражают всего спектра важнейших показателей, по которым могут быть выполнены полная оценка пригодности углей и прогноз ожидаемой эффективности от их применения в ферросплавном производстве.

Угли, которые могут быть использованы в качестве восстановителя в натуральном виде без предварительной термической обработки, должны иметь малое содержание минеральных примесей, благоприятный их химический состав, достаточную термическую и механическую прочность, низкую графитируемость, высокие электросопротивление и реакционную способность.

Многочисленными исследованиями ВУХИНа и его Кузнецкого центра показано, что основные физико-химические свойства кокса как углеродистого восстановителя, такие как реакционная способность и удельное электросопротивление, во многом зависят от стадии метаморфизма углей, используемых для коксования [13]. Отмечено, что наибольшие значения этих показателей свойственны коксам, полученным из низкометаморфизованных бурых, длиннопламенных и газовых углей с высоким выходом летучих веществ. В связи с этим особое внимание при выборе углей и замене ими кокса уделяется именно длиннопламенным и в последнее время бурым углям [6, 14, 15].

ТАБЛИЦА 1. НОРМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА УГЛЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРОСПЛАВОВ
(по ГОСТ P51588–2000, табл. 4)

TABLE 1. NORMS OF INDICES OF COALS QUALITY FOR PRODUCTION OF FERROALLOYS
(as per GOST P51588–2000, table 4)

Показатель	Марка угля			
	СС	Т		А
Состояние угля	Обогащенные и необогащенные			
Размер кусков, мм	25–50 13–50	25–50	13–50	25–40
Массовая доля общей влаги W_t^r , %, не более	10,0	8,0	9,0	5,0
Зольность A^d , %, не более	10,0	13,0	14,0	12,0
Массовая доля кусков размером менее нижнего предела, %, не более	20,0	20,0	20,0	20,0

В последние годы генеральной линией производства ферросилиция на предприятии “А” является использование различных углей без их предварительной термической обработки [6, 15]. Работы по замене кокса углями ведутся поэтапно. При выплавке ферросилиция испытаны тощие угли (Т) и антрациты (А), как рекомендует ГОСТ Р 51588–2000. Однако достичь желаемых результатов не удалось [16–21]. Аналогичными опытами на заводе ферросплавов “С” показана эффективность использования тощих углей и антрацита в шлаковых процессах выплавки ферросплавов (феррохром и т. п.) [5, 22].

На предприятии “А” ранее были испытаны и внедрены угли марки СС, использование которых в шихтовке кокс + уголь СС + щепа позволило улучшить технико-экономические показатели (ТЭП) плавки ферросилиция ФС75 [23–25]. При этом среднегодовая доля замены кокса углем СС (по углероду) составила 30 %.

Целью последующих работ на предприятии “А” было дальнейшее снижение затрат на вы-

плавку ферросилиция ФС75 в открытых печах при испытании смеси восстановителей, включающей кокс (К), длиннопламенный уголь (Д), бурый уголь (Б) и древесную щепу (Щ).

Первоначально использовался обогащенный ($A^d = 4,9$ %) уголь Д Кузбасса, применение которого обеспечивало замену 30–45 % кокса (по углероду) при одновременном значительном улучшении ТЭП открытых печей. Печи успешно работали без отсева мелочи угля.

В последнее время на рынке восстановителей из числа углей появился длиннопламенный уголь Шубаркольского месторождения, Казахстан. Этот уголь стал предметом широких испытаний при замене им максимально возможного количества кокса. При этом в углеродистой части шихты использовался бурый уголь Кузбасса.

Качественная характеристика углей марок Д и Б, использованных в испытаниях, приведена в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. КАЧЕСТВО УГЛЕЙ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

TABLE 2. COALS QUALITY FOR INDUSTRIAL TESTS

Показатель	Уголь Д Шубаркольского месторождения	Уголь Б Кайчакского разреза	Кокс
Технический анализ, %:			
W_t^r	11,8	32,7	8,7
A^d	2,8	11,4	12,5
V^{daf}	44,1	45,8	1,5
S^d	0,40	0,35	0,42
P^d	0,009	0,003	0,047
Содержание углерода (C_{fix}), %	54,3	48,0	86,2
Гранулометрический состав (%) по классам, мм:			
150–100	3,9	4,5	—
100–50	34,9	23,2	—
50–20	39,4	40,7	2,0
20–10	9,6	16,1	85,1
10–5	5,0	6,8	9,2
5–0	7,2	8,7	3,7

Показатель	Уголь Д Шубаркольского месторождения	Уголь Б Кайчакского разреза	Кокс
Средний размер куска d_{cp} , мм	46,9	40,0	13,4
Элементный состав на органическую массу, %:			
C^{daf}	78,58	72,49	97,11
H^{daf}	5,09	4,50	0,72
N^{daf}	1,57	1,29	1,15
O^{daf}	14,34	21,33	0,54
S^{daf}	0,42	0,39	0,48
Теплота сгорания, ккал/кг (МДж/кг):			
высшая, Q_s^{daf}	7500 (31,40)	6650 (27,84)	7950 (33,28)
низшая, Q_i^r	6250 (26,17)	3630 (15,20)	7100 (29,72)
Реакционная способность по CO_2 при 1000 °С, K_{CO_2} , $cm^3/(г \cdot c)$	5,10	5,47	0,47
Удельное электросопротивление по классу 6–3 мм, $\rho = 0,2 \text{ кг/см}^3$, ρ , Ом·см	$>1,9 \times 10^6$	$>1,9 \times 10^6$	3,9
Плотность, $г/см^3$:			
действительная, d_r^d	1,420	1,697	1,952
кажущаяся, d_a^d	1,147	0,891	1,040
Пористость P_r^d , %	19,2	47,5	46,7
Общий объем пор $W_{общ}$, $cm^3/г$	0,168	0,533	0,449
Структурная прочность P_c , %	63,3	55,7	87,4
Термическая стойкость ПТС, %	75,4	25,8	98,7

Отличительной особенностью длиннопламенного угля Шубаркольского месторождения (см. табл. 2) является его низкая зольность ($A^d = 2,8 \%$) с содержанием углерода (C_{fix}^{daf}) в среднем 54 %, на органическую массу (C^{daf}) — 78,6 %. В связи с этим содержание минеральных примесей в угле низкое и составляет 5,2 кг на 100 кг углерода. Его теплота сгорания достаточно высокая (Q_s^{daf}) и составляет 7500 ккал/кг.

Преимуществом шубаркольского угля как углеродистого восстановителя является высокая реакционная способность по CO_2 при 1000 °С — 5,1 $cm^3/(г \cdot c)$ против 0,47 $cm^3/(г \cdot c)$ у кокса и очень большое удельное электросопротивление — более $1,9 \times 10^6$ Ом·см против 3,9 Ом·см у кокса. Однако он по сравнению с коксом менее механически и термически стойкий (структурная прочность 63,3 против 87,4 %, термическая стойкость — 75,4 против 98,7 %), а также имеет высокий выход летучих веществ ($V^{daf} = 44,1 \%$ против 1,5 % у кокса).

Особенностью шихтовки печей предприятия является использование в составе углеродистой части дешевого бурого угля Кайчакского разреза Кузбасса (см. табл. 2). Уголь характеризуется высокими влажностью (W^r в среднем 33 %) и выходом летучих веществ ($V^{daf} = 45,8 \%$) и достаточно малым содержанием углерода (около 48 %). Зато как углеродистый восстановитель он имеет высокую реакционную способность [$K_{CO_2} = 5,47 \text{ см}^3/(г \cdot c)$] и очень большое удельное электросопротивление (более $1,9 \times 10^6$ Ом·см). По

сравнению с коксом он механически и термически менее прочный ($P_c = 55,7$ и ПТС = 25,8 % против 87,4 и 98,7 % соответственно у кокса). Тем не менее многолетнее его использование в составе шихты позволило выявить его положительную роль в технологическом процессе: повышенная влажность снижает температуру на колошнике печи, позволяет в температурных условиях печи сохранить высокие показатели химической активности и электросопротивления, а бурное выделение летучих веществ при его пиролизе на колошнике предохраняет от угара восстановителей и уменьшает улет монооксида кремния.

Здесь следует указать на ряд специфических свойств длиннопламенного и бурого углей, которые необходимо учитывать при их использовании в технологии выплавки кремнистых ферросплавов.

По химическому составу золы и температуре ее плавления длиннопламенный уголь и кокс близки (табл. 3). Бурый уголь имеет резкие отличия по этим показателям. Содержание CaO достаточно высокое и составляет в среднем 30,7 % (в отдельных случаях до 42 %) против 6,67 и 5,56 % у угля Д и кокса, а содержание Al_2O_3 в 2,2 и 2,4 раза ниже. Кроме того, температура плавления золы бурого угля, а именно ее жидкоплавкого состояния (t_c), низкая и достигает 1290 °С против 1340 и 1400 °С у кокса и угля Д соответственно. В соответствии с химическим составом золы бурый уголь характеризуется высоким индексом основности ($I_{осн} = 31,1$) и низкими коэффициен-

тами плавления золы ($K_{пл} = 0,68$), вязкости шлака ($K_{в} = 0,40$) и температурой жидкого шлакоудаления ($T_{н.ж} = 1320$ °С). Указанные особенности минеральной части бурого угля при его ис-

пользовании могут сказаться на шлаковом режиме работы ферросплавных печей и качестве ферросилиция (повышенное содержание кальция в сплаве).

ТАБЛИЦА 3. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЗОЛЫ УГЛЕЙ И КОКСА

TABLE 3. CHEMICAL COMPOSITION OF COALS ASH AND COKE

Показатель	Уголь Д Шубаркольского месторождения	Уголь Б Кайчакского разреза	Кокс КХП Сибири
Содержание минеральных примесей на 100 кг углерода (C_{fix}), кг	5,2	23,7	14,5
Химический состав золы (ГОСТ 10538–87) по оксидам, %:			
SiO ₂	47,52	22,80	47,98
Al ₂ O ₃	21,98	9,80	23,72
Fe ₂ O ₃	4,90	12,40	13,12
CaO	6,67	30,70	5,56
MgO	5,67	4,75	1,88
TiO ₂	0,99	0,25	1,01
P ₂ O ₅	0,48	0,10	0,68
SO ₃	6,30	3,50	3,90
K ₂ O	0,07	0,20	0,49
Na ₂ O	0,11	0,15	0,43
Содержание оксидов на 100 кг углерода, %:			
SiO ₂	2,47	5,40	6,96
Al ₂ O ₃	1,14	2,32	3,44
Fe ₂ O ₃	0,25	2,94	1,90
CaO	0,35	7,28	0,81
MgO	0,29	1,13	0,27
TiO ₂	0,05	0,06	0,15
P ₂ O ₅	0,02	0,02	0,10
SO ₃	0,33	0,83	0,57
K ₂ O	0,004	0,047	0,071
Na ₂ O	0,006	0,036	0,062
Температура плавления золы, (ГОСТ 32978–2014), °С:			
температура начала деформации (t_A)	1130	1220	1240
температура полусферы (t_B)	1340	1260	1270
температура растекания (t_C)	1400	1290	1340
Коэффициент плавления золы $K_{пл}$	4,03	0,68	3,46
Индекс основности $I_{осн}$	1,26	31,10	3,80
Коэффициент вязкости шлака $K_{в}$	1,22	0,40	1,10
Температура нормального жидкого шлакоудаления $T_{н.ж.}$, °С	1470	1320	1430

Поскольку уголь в ферросплавных печах предполагается использовать в естественном виде, то он, попадая в высокотемпературные зоны печи, будет претерпевать термическую деградацию (пиролиз) с выделением парогазовой смеси, состоящей из собственного газа, химических продуктов (в том числе и смолы) и влаги. В связи с этим для изучения особенностей пиролиза малометаморфизованных углей, используемых на заводе бурого и длиннопламенного углей в условиях, приближающихся к условиям

работы колошника открытых печей, был определен выход газообразных, жидких и твердых продуктов при нагревании. Условия опытов по ГОСТ 18635–88: нагрев загрузки угля в печи до 900 °С со скоростью 5 °С/мин и выдержкой 20 мин с последующим пиролизом парогазовой смеси при 800 °С в течение 30 мин с определением выхода продуктов и состава газа.

Результаты проведенных опытов с углями в сравнении с коксом приведены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. ВЫХОД И СОСТАВ ХИМИЧЕСКИХ ПРОДУКТОВ ПРИ НАГРЕВЕ УГЛЕЙ И КОКСА ДО 900 °С

TABLE 4. YIELD AND COMPOSITION OF CHEMICAL PRODUCTS AFTER COALS AND COKE HEATING TILL 900 °C

Показатель	Уголь Д Шубаркольского месторождения	Уголь Б Кайчакского разреза	Кокс
Выход химических продуктов на сухую массу, %:			
пирогенетическая влага W_K^d	7,03	13,84	0,21
смола T_K^{daf}	2,47	6,18	Отс.
бензол	1,04	0,83	Отс.
аммиак	0,45	0,20	Отс.
кокс K_C^{daf}	61,74	53,15	99,03
газ (+потери) G_K^{daf}	27,27	25,80	0,76
Выход газа фактический, м ³ /т	396	322	17
Состав газа, % объемн. на сухое (ГОСТ 5439–76):			
H ₂ S	0,38	0,22	0,52
CO ₂	9,35	15,68	11,16
C _m H _n	2,01	1,15	0,42
O ₂	0,50	0,50	0,50
CO	21,31	16,68	19,54
H ₂	33,20	40,46	46,52
CH ₄	25,35	23,83	1,25
N ₂	7,90	1,48	20,09
Содержание восстановительных компонентов в газе (CO + H ₂):			
% (объемн.)	54,51	57,14	66,06
м ³ /т	215,9	184,0	11,2
Плотность газа, кг/м ³	0,8044	0,7750	1,2465
Теплота сгорания газа:			
ккал/м ³	3955	3797	208
МДж/м ³	16,56	15,90	0,87

Как следует из табл. 4, выход химических продуктов пиролиза углей марок Д и Б характеризуется повышенным содержанием пирогенетической влаги (7,03 и 13,84 %) и смолы (2,47 и 6,18 %) с минимальными показателями у шубаркольского угля, а также наличием небольшого количества бензола (0,83 и 1,04 %) и аммиака (0,20–0,45 %). У кокса вышеуказанные продукты отсутствуют, так как он в промышленных условиях получен при 950–1000 °С. Более половины выделяющихся продуктов пиролиза углей приходится на твердые (кокс) — 53,15–61,74 %.

Большой интерес при нагреве углей представляет газовая фаза, поскольку от ее объема и состава будет зависеть тепловая и восстановительный режимы работы печи, преимущественно на ее колошнике. Фактический объемный выход газа у углей достаточно высокий и составляет 322 м³/т (уголь Б) и 396 м³/т (уголь Д), у кокса — всего 17 м³/т.

С позиции использования углей взамен кокса особое внимание следует обратить на характеристику выделяющегося газа. Положительным свойством газа следует считать высокое содержание

в нем восстановительных компонентов CO и H₂ в объеме 184 м³/т (уголь Б) и 215,9 м³/т (уголь Д). Этот эффект у кокса практически отсутствует: содержание CO + H₂ в нем лишь 11,2 м³/т. Как следует из работ [26, 27], при пиролизе углей в условиях металлургических агрегатов при 1500 °С содержание CO + H₂ достигает 93 %. Исследования [28–30] показали большие возможности газа из бурого угля при восстановлении оксида железа. Термодинамическими расчетами [31] температур реакций в системе Si–O–C показано, что реакции в газовой фазе потоков SiO_g из глубины печи и летучих продуктов пиролиза угля будут проходить с минимальной энергией активации и восстановительная способность последних будет возрастать с увеличением доли низкомолекулярных компонентов.

Опытно-промышленные испытания длинно-пламенных и бурых углей при выплавке ферросилиция ФС75 были проведены на предприятии «А» с целью определения максимально возможной замены ими кокса.

За базовый (сравнительный) период было взято время работы печи по выплавке ферроси-

лиция ФС75 и с постоянным использованием в шихте достаточно большого количества длинно-пламенного и бурого углей. Состав углеродистой части шихты (на 250 кг кварцита) был следующий, кг: кокс + 20 уголь Б + 90 уголь Д + 50 щепа (условное обозначение — 20Б/90Д/50Щ). Такая шихтовка обеспечивала плановые показатели производства ферросилиция ФС75 при замене кокса углями до 53 %, а в зимний период до 60 %. Состояние печи было удовлетворительным, средняя температура отходящих газов под зонтом составляла 218 °С, содержание алюминия и кальция в сплаве находилось в регламентных пределах.

Кампанию по выплавке ферросилиция ФС75 с повышенными навесками длиннопламенного угля провели в три этапа в соответствии с ших-

товкой (на 250 кг кварцита) и различной заменой кокса (по углероду):

1. Шихтовка 20Б/165Д/35Щ с заменой 88 % кокса.

2. Шихтовка 20Б/165Д/60Щ с заменой 89 % кокса.

3. Шихтовка 20Б/190Д/60Щ с заменой 99 % кокса.

Навеска бурого угля в шихте оставалась постоянной и составляла 20 кг, изменялось лишь содержание угля Д от 165 до 190 кг и древесной щепы с 35 до 60 кг.

Результаты промышленных испытаний углей приведены в табл. 5. Опыты проводили в существующих условиях работы открытой печи с высоким зонтом и в жестких условиях контрактов по химическому составу ферросилиция (Al <1,08 %, Ca <0,15 %).

ТАБЛИЦА 5. ПОКАЗАТЕЛИ ВЫПЛАВКИ ФЕРРОСИЛИЦИЯ ФС75 НА ПЕЧИ ПРЕДПРИЯТИЯ “А” С ЗАМЕНОЙ КОКСА НА ДЛИННОПЛАМЕННЫЙ И БУРЫЙ УГОЛЬ

TABLE 5. INDICES OF ФС75 FERROSILICON SMELTING IN THE PLANT “А” FURNACE WITH SUBSTITUTION OF COKE BY LONG-FLAME AND BROWN COAL

Показатель	Базовый период	Опытные периоды		
		1	2	3
Доля замены кокса по углероду, %	53	88	89	99
Состав углеродистой части шихты (на 250 кг кварцита), кг/колошу	20Б/90Д/50Щ	20Б/165Д/35Щ	20Б/165Д/60Щ	20Б/190Д/60Щ
Длительность кампании, сут	30	25	17	12
Производительность печи, $\frac{\text{баз. т/сут}}{\% \text{ (отн.)}}$	$\frac{47,58}{100}$	$\frac{48,21}{101,3}$	$\frac{47,56}{100,0}$	$\frac{46,39}{97,5}$
Удельный расход электроэнергии, $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч/баз. т}}{\% \text{ (отн.)}}$	$\frac{8362}{100}$	$\frac{8258}{0,98}$	$\frac{8310}{0,99}$	$\frac{8539}{102,1}$
Удельный расход сырья, т/баз. т:				
кварцит	1,801	1,778	1,781	1,800
кокс (сухой)	0,394	0,106	0,097	0,006
уголь Д (W = 9 %)	0,640	1,162	1,158	1,339
уголь Б (W = 30 %)	0,156	0,134	0,130	0,134
древесная щепа	0,270	0,255	0,377	0,361
стружка	0,189	0,190	0,189	0,181
Температура отходящих газов, °С:				
под зонтом	218	260	237	274
на газоочистке	154	170	166	173
Содержание вредных элементов в сплаве, %:				
алюминий	1,08	1,05	1,04	1,05
кальций	0,15	0,25	0,24	0,36
Избыток углерода, отн. ед	1,00	1,04	1,00	1,04
Извлечение кремния в сплав, %	88,44	90,28	89,87	89,54
Содержание кремния в сплаве, %	77,35	77,55	77,50	77,45

Выбор печи для проведения опытных кампаний был обусловлен лучшими условиями ее работы, а именно возможностью:

– использования на газоочистке фильтрованных рукавов из ткани “Номекс” с повышенной температурой эксплуатации до 200 °С;

– использования восьми бункеров для подачи шихтовых материалов;

– дополнительной подготовки угля в шихтовом дворе.

Характеристика печи:

Тип печи	РКО-20, открытая, трехфазная
Номинальная мощность трансформатора, кВА	20000
Фактически используемая мощность S , кВА	18315
Используемая активная мощность P_a , кВА	16484
Коэффициент мощности $\cos \varphi$	0,90
Фактические размеры рабочего пространства ванны, мм:	
диаметр	6400
глубина	2410
Диаметр электродов, мм	1200
Диаметр распада электродов, мм	2900

Качество углей, использованных в промышленных испытаниях, приведено в табл. 2.

В ходе кампании шубаркольский уголь Д поступал на предприятие крупностью 50–150 мм. На печь его подавали без дробления, но с отсевом мелочи класса 5–0 мм, бурый уголь разреза Кайчакский использовали без подготовки, кокс — с дроблением и с отсевом мелочи класса 5–0 мм. В целом угли Д и Б подавали на печь в довольно крупном размере (см. табл. 2). Например, содержание класса 100–10 мм для угля Д составило 83,9 %, угля Б — 80,0 % со средним размером куска 46,9 и 40,0 % соответственно. Кокс соответствовал технологической крупности 20–10 мм, равной 85,1 %.

Анализ технологических показателей работы печи по этапам с использованием в шихте повышенного количества углей показал следующее.

Первый этап. После повышения навески угля Д с 90 до 165 кг/колошу для сохранения устойчивой амперной нагрузки на электродах навеску кокса снижали до расчетного уровня постепенно в течение смены.

На протяжении всего периода печь работала преимущественно на 4-й ступени трансформатора с токовой уставкой 1130 А. Примерно 7 сут металл выходил бурно с повышенным количеством шлака. Затем выход металла ухудшился, количество шлака по сравнению с базовым периодом уменьшилось. Из-за низкого напряжения по “высокой” стороне печь кратковременно переключали на 3-ю ступень трансформатора (4 сут). Одновременно для улучшения выхода шлака дважды за период в смене 3 на колошник задавали по 1 т известняка. После повторного ввода известняка отмечено фоновое повышение концентрации алюминия и кальция в металле, продолжающееся 6 сут.

Для наращивания электродов усилили их перепуск до 1,04 мм/(МВт·ч) (413 мм/сут). Средняя

температура отходящих газов за период повысилась на 43 °С и составила 260 °С.

Второй этап. Период работы характеризовался повышением навески щепы с 35 до 60 кг/колошу и работой на 4-й ступени трансформатора без его переключений. Состояние колошника визуально улучшилось, однако участились случаи обвалов шихты под электродами и замедлился выход металла и шлака. Для улучшения выхода шлака произвели одну дачу на колошник 1 т известняка.

Снижение средней температуры отходящих газов под зонтом с 260 до 237 °С и на газоочистке со 170 до 166 °С (по сравнению с предыдущим периодом кампании) связано с резким понижением температуры окружающего воздуха на 15–20 °С.

Сокращение среднего уровня перепуска электродов составило 14 мм/сут, что предопределило их укорачивание за период на 220–250 мм. Фактически длина всех электродов составила примерно 2,5 м, что не соответствовало регламентированному значению длины электродов 2,7–2,9 м в программе испытаний.

Третий этап. После перевода печи на шихтовку со 100 %-ным использованием угля напряжение по “высокой” стороне составляло 10,1–10,3 кВ. Для обеспечения суточного съема электроэнергии, необходимого для выполнения плана производства, печь № 5 перевели на 3-ю ступень трансформатора с токовой уставкой 1100 А. С учетом неоптимальной длины электродов их посадка была нестабильной с большой амплитудой колебаний. Для наращивания и обеспечения средней посадки электродов увеличили перепуск электродов до 467 мм/сут, работали с “нулевым” избытком углерода и с пониженным уровнем колошника. Загрузку печи осуществляли преимущественно бросковыми машинами.

Период начала кампании по 100 %-ному использованию угля совпал с поступлением на предприятие партии крупного кварцита. Размер отдельных кусков кварцита и угля, попадающих на колошник, достигал 300 мм в одном измерении. В течение первых двух суток периодически происходило забивание центральной трубопроводки. Крупные куски кварцита и угля Д при машинной загрузке скатываются к основанию конусов шихты у электродов, уголь сгорает без участия в реакциях восстановления, по периферии формируются настывы из непроплавленной шихты, реакционные тигли визуально сужаются, увеличиваются потери кремния в виде SiO, повышается температура отходящих газов.

При работе с электродами неоптимальной длины на 3-й ступени трансформатора с “нулевым” расчетным избытком углерода печь фактически перешла в режим “кварцевания”, что до-

полнительно привело к ухудшению выхода металла и шлака. Для улучшения выхода металла и шлака в этот период на колошник задали известняк в количестве 1,2 и 0,8 т и перевели печь на 4-ю ступень трансформатора. Через двое суток после перевода печи на 4-ю ступень трансформатора и двойной загрузки известняка посадка электродов стабилизировалась, что позволило усилить их перепуск и одновременно повысить избыток углерода в шихте. В свою очередь, последующая работа с избытком углерода сопровождалась закарбидированием ванны печи и потребовала ввода известняка.

Заключительная неделя работы печи со 100 %-ным использованием угля характеризовалась повышением напряжения на “высокой” стороне до 10,4–10,7 кВ и повышением уровня перепуска электродов до 1,18 мм/(МВт·ч) (471 мм/сут). В течение последних шести суток съем электроэнергии превышал 400 кВт·ч/сут, что обеспечило выполнение плана производства.

В соответствии с программой проведения опытной кампании добавки кокса производили исключительно для корректировки электрического режима печи и улучшения состояния колошника.

На всех этапах по увеличению навесок угля Д отмечено повышение температуры отходящих газов, особенно перед выпуском (рост посадки электродов, накапливание металла). При использовании навески угля Д в количестве 165 кг/колошу максимальное повышение температуры отходящих газов составляло 350 °С, на газоочистке — 200 °С.

При работе печи со 100 %-ной заменой кокса температура отходящих газов под зонтом повысилась и эпизодически превышала 400 °С (на газоочистке — 200–218 °С), что представляло реальную опасность для оборудования печи и рукавных фильтров.

Во время выпуска ферросилиция газоочистка печи не справлялась с эвакуацией повышенного количества газов из-под зонта, что создавало неблагоприятные условия труда.

В результате использования повышенных навесок угля Д (190 кг/колошу), особенно на заключительном этапе кампании, резко ухудшилось состояние рукавных фильтров на газоочистке печи и сократился срок их эксплуатации. Однако с учетом оценки состояния фильтров при условии дальнейшего использования в зимний период навески угля Д не более 120 кг/колошу появилась реальная возможность продолжения эксплуатации фильтров (на шесть месяцев).

Анализ прямых затрат выплавки ферросилиция ФС75 на печи с повышенными навесками шубаркольского угля Д с 90 до 190 кг/колошу свидетельствует о том, что данная замена в целом сопровождается сокращением затрат прежде всего за счет снижения расхода кокса и удельного расхода электроэнергии. Практически установлено, что в период пониженных температур окружающего воздуха (декабрь–март) на печи целесообразно использовать шихтовку 20Б/165Д/60Щ, обеспечивающую замену кокса до 89 % при минимальном уровне прямых затрат на сырье и электроэнергию.

На предприятии “В” в практике производства ферросилиция ФС75 в шихте используются повышенные навески длиннопламенного угля Шубаркольского месторождения. Состав колоши шихты (в пересчете на 250 кг кварцита) следующий, кг: кокс + 180 уголь Д + 80 щепа. Бурый уголь не применяется. Такая шихтовка используется на печах с низким зонтом с активной мощностью 17,5 и 25,5 МВт. Показатели работы печей приведены в табл. 6. По сравнению с работой печи с боковым токоподводом на предприятии “А” (см. табл. 5) при использовании близкой навески угля Д открытые печи с низким зонтом предприятия “В” работают с повышенным избытком углерода на 4–5 %, доля замены кокса углем составляет 84 %, что на 4–15 % ниже, чем при использовании шихтовки 20Б/165Д/35–60Щ. Полная замена кокса длиннопламенным углем на печах не практикуется, поскольку, как показал опыт, это негативно сказывается на уровне технологических показателей выплавки ферросилиция. Неоспоримым преимуществом работы печей с низким зонтом предприятия “В” является возможность сохранения постоянной повышенной навески угля Д (до 84 % замены кокса) независимо от времени года.

Показательным и достаточно положительным является опыт работы печей завода ферросплавов “С”, Казахстан, выплавляющих ферросилиций ФС75 с применением длиннопламенного угля Шубаркольского месторождения.

Исходный уголь поступал на завод крупностью 5–100 мм, из которого затем отсеивалась мелочь 0–5 мм, количество которой находилось в пределах 4–7 %. Класс крупнее 100 мм дробился, в результате чего образовывалось дополнительное количество мелочи. Гранулометрический состав угля, подаваемого на печи, был следующим, %: >40 мм — 41,3; 40–20 мм — 22,5; 20–10 мм — 15,8; 10–5 мм — 12,0; 5–0 мм — 8,4. Качество угля по входному контролю, %: W^r — 8,8; A^d — 2,9; V^{daf} — 42,9; S^d — 0,22; P^d — 0,008.

ТАБЛИЦА 6. ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ПЕЧЕЙ ПРИ ВЫПЛАВКЕ ФЕРРОСИЛИЦИЯ ФС75 НА ПРЕДПРИЯТИИ “В” С ПОВЫШЕННОЙ ДОЛЕЙ ЗАМЕНЫ КОКСА ДЛИННОПЛАМЕННЫМ УГЛЕМ

TABLE 6. INDICES OF THE FURNACE OPERATION AT ФС75 FERROSILICON SMELTING AT PLANT “В” WITH INCREASED SHARE OF COKE SUBSTITUTION BY LONG-FLAME COAL

Показатель	Опыт 1	Опыт 2
Доля замены кокса по углероду, %	83,8	84,2
Состав углеродистой части шихты (на 250 кг кварцита), кг/колошу	ОБ/180Д/80Щ	ОБ/180Д/80Щ
Длительность кампании, сут	31	31
Активная мощность печи, МВт	25,5	17,5
Производительность печи, баз. т/сут	66,96	46,94
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/баз. т	9068	9014
Удельный расход сырья, т/баз. т:		
кварцит	1,847	1,847
кокс (сухой)	0,151	0,146
уголь Д (влажный)	1,308	1,305
щепа	0,598	0,580
стружка	0,255	0,255
Избыток углерода, отн. ед	1,10	1,09
Извлечение кремния в сплав, %	88,08	88,09
Содержание кремния в сплаве, %	75,45	75,80

Результаты промышленного использования угля Д при частичной и полной замене им кокса приведены в табл. 7. Наибольший интерес пред-

ставляют результаты работы печей на одном угле (100 %).

ТАБЛИЦА 7. ПОКАЗАТЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРОСИЛИЦИЯ ФС75 НА ЗАВОДЕ “С” С ЗАМЕНОЙ КОКСА НА ДЛИННОПЛАМЕННЫЙ УГОЛЬ

TABLE 7. INDICES OF ФС75 FERROSILICON PRODUCTION AT THE PLANT “С” WITH SUBSTITUTION OF COKE BY LONG-FLAME COAL

Показатель	Базовый период с коксом	Опытный период с частичной заменой кокса углем Д	Опытный период с углем Д
Доля замены кокса углем (по углероду), %	—	40	100
Производительность печи, $\frac{\text{т/сут}}{\% \text{ (отн.)}}$	$\frac{46,3}{100,0}$	$\frac{44,0}{95,0}$	$\frac{43,3}{93,5}$
Удельный расход электроэнергии, $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч/т}}{\% \text{ (отн.)}}$	$\frac{10292}{100,0}$	$\frac{10390}{100,9}$	$\frac{10400}{101,0}$
Удельный расход сырья, кг/т:			
кварцит	2106	2105	2114
восстановитель	957	988	1017
стружка	192	166	178
Извлечение кремния в сплав, %	78,3	78,5	78,5
Содержание алюминия в сплаве, %	1,17	1,39	1,62

В течение всего опытного периода работа печей в основном не отличалась от обычного технологического режима. По всей поверхности колошника наблюдалось равномерное газовыделение, отсутствовали потемневшие спекшиеся участки и “свищи”, сход шихты равномерный (иногда с обвалами) у электродов и в треугольнике между ними, посадка электродов также устойчивая. В смену делалось по три–четыре вы-

пуска металла с регулярным выходом шлака (иногда возникали трудности с выходом шлака) и свободным выходом газа.

Повышенный выход летучих веществ угля существенно не повлиял на газовый режим работы печей. Основной объем летучих угля выделяется в интервале температур 500–700 °С [27], имеющих место в верхних слоях колошника. Это способствовало улучшению газопроницаемости

шихты на колошнике, что подтверждалось фактическим состоянием колошника: равномерный выход летучих веществ, отсутствие свищей и спекающихся участков. Уголь при выделении летучих растрескивался, что приводило к увеличению реакционной поверхности и рыхлению колошника за счет увеличения объема угля в процессе его температурной обработки.

Установленное при скоростном пиролизе угля свойство к вспучиванию [28] эффективно использовано в качестве рыхлителя для управления верхними горизонтами печей (колошника). При этом образующийся высокопористый углеродистый материал наряду с функциями восстановителя одновременно играл роль сорбирующего материала для восходящих газовых потоков. Фактически данное свойство угля, кроме основного его назначения как восстановителя, используется на заводе "С" для управления верхом печей при выплавке кремнистых сплавов.

Как видно из табл. 7, при работе печей на одном угле (100 %) по сравнению с другими опытными периодами с частичной заменой кокса углем происходит перерасход восстановителя, увеличение удельного расхода кварцита и электроэнергии, а также увеличение содержания алюминия в металле. Производственники объясняют это тем, что уголь, по-видимому, не участвует в полном объеме в процессе восстановления, так как часть угля сгорает на колошнике, а часть идет на образование карбидов. Для обеспечения полного процесса восстановления печи работали с повышенным содержанием твердого углерода. Работа печей цеха с использованием в качестве восстановителя одного угля (без кокса) привела к незначительному снижению производительности печи и увеличению удельного расхода электроэнергии. Из-за повышения температуры на колошнике произошло увеличение горячих простоев по причине устранения течи воды в системе водоохлаждения печей, что и привело, в частности, к увеличению удельного расхода электроэнергии. Увеличение температуры газа при выходе из печи привело к некоторому ухудшению работы системы газоочистки. Изменился химический состав колошниковой пыли (микросилики): снизилось содержание кремнезема и повысилось содержание углерода.

Производительность печей в опытный период по сравнению с плановым заданием (42,7 т/сут) осталась на прежнем уровне, удельный расход электроэнергии (10400 кВт·ч/т) — в пределах нормы. Экономическая эффективность использования шубаркольского угля вместо кокса определяется главным образом более низкой его стоимостью.

Таким образом, большой промышленный опыт работы печей завода "С", выплавляющих

ферросилиций ФС75, убедительно показал технологическую возможность и экономическую целесообразность полной замены кокса длинно-пламенным углем. Рекомендуется использовать уголь преимущественно в холодные периоды года.

В контексте проблемы применения углей в производстве ферросплавов следует рассмотреть положительный опыт использования бурого угля ЗБВ Майкюбенского месторождения, Казахстан, взамен кокса при выплавке ферросилиция ФС75 на заводе ферросплавов "С" [14]. Качество бурого угля, %: $W^r = 19,3$; $A^d = 23,3$; $V^{daf} = 40,8$; $S^d = 0,57$; $P^d = 0,060$. Бурый уголь характеризовался высокими по сравнению с коксом реакционной способностью (в 13,3 раза выше) и удельным электросопротивлением (выше на 9 порядков). При нагревании угля до 1000 °С эти преимущества сохранились. Однако уголь был менее механически и термически стоек, чем кокс ($\Pi_c = 65,7$ % и ПТС = 67,0 % против 83,0 % и 98,6 % у кокса соответственно). При испытаниях уголь подавался на печь крупностью 50–15 мм с содержанием мелочи в среднем до 8 %.

При выплавке ферросилиция ФС75 в открытой печи мощностью 16,5 МВА с использованием до 37 % бурого угля (по углероду) взамен кокса производительность печи возросла на 3,4 %, удельный расход электроэнергии сократился на 1,6 % (табл. 8). Вместе с тем содержание алюминия в сплаве увеличилось с 1,85 до 2,22 %. Внепечным рафинированием сплава сидеритом удалось уменьшить содержание алюминия на 9–19 % (отн.).

Кроме того, были проведены кампании по использованию бурого угля в закрытых печах РКЗ-63 при выплавке ферросилиция ФС45 и ФС65 [14]. Все печи цеха № 6 работали на шихте с 30 %-ной заменой кокса бурым углем (от навески по углероду). После введения угля по 70 и 120 кг в шихте участились случаи повышенного содержания водорода в подсудовом пространстве. Автоматическое отключение печи в результате его превышения >12 % приводило к частым простоям. В начале опытного периода отмечались большие глубинные обвалы из-за спекания шихты на колошнике. Большой выход летучих веществ привел к значительному ухудшению работы газоочистки, участились горячие простои для чистки щелевого газосборника и газохода. При уменьшении содержания угля в шихте (до 50 кг) заметно сократились простои из-за чистки аппаратов газоочистки, реже стали обвалы шихты, содержание водорода уменьшилось до 5–10 %, работа печных агрегатов стабилизировалась. В течение всего опытного периода работы печи отмечали глубокую устойчивую посадку электродов и нормальный выход преимущественно жидкого шлака. Основные технологические показа-

тели работы печей при использовании бурого угля мало отличались от таковых в базовом периоде. Было отмечено снижение расхода кокса

на 15–29 %. Вместе с тем в сплаве возросло содержание алюминия на 0,4–0,5 % (отн.).

ТАБЛИЦА 8. ПОКАЗАТЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРОСИЛИЦИЯ ФС75 НА ЗАВОДЕ “С” С ЗАМЕНОЙ КОКСА НА БУРЫЙ УГОЛЬ

TABLE 8. INDICES OF ФС75 FERROSILICON PRODUCTION AT THE PLANT “С” WITH SUBSTITUTION OF COKE BY BROWN COAL

Показатель	Базовый период	Опытный период
Доля замены кокса углем по углероду, %	—	37
Состав шихты, кг:		
кварцит	450	450
кокс	240	160
уголь	—	180
Длительность кампании, сут	30	30
Используемая мощность печи, МВА	16,5	16,9
Производительность печи, $\frac{\text{т/сут}}{\% \text{ (отн.)}}$	$\frac{38,5}{100,0}$	$\frac{39,8}{103,4}$
Удельный расход электроэнергии, $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч/т}}{\% \text{ (отн.)}}$	$\frac{10128}{100,0}$	$\frac{9963}{98,4}$
Удельный расход сырья, кг/т:		
кварцит	1570	1570
кокс	895	540
уголь	—	600
Извлечение кремния в сплав, %	98,3	98,2
Содержание в сплаве, %:		
кремний	76,72	76,75
алюминий	1,85	2,22

Промышленными испытаниями на заводе ферросплавов “С” показана целесообразность применения бурого угля в качестве углеродистого восстановителя при выплавке ферросили-

ция ФС75 (в открытых печах) и ФС45, ФС65 (в закрытых печах). При этом доля замены кокса бурым углем может составить не более 15–30 %.

Заключение

1. Использование углей как углеродистых восстановителей вместо кокса является перспективным направлением повышения ТЭП производства ферросплавов.

2. Угли обладают широким диапазоном свойств и относительно к производству ферросплавов имеют как положительные, так и отрицательные свойства. Проведенные исследования качества углей низкой стадии метаморфизма (длиннопламенных и бурых) показали, что имеются все теоретические предпосылки для успешного использования их в производстве ферросилиция.

3. Результаты промышленных испытаний углей на трех ферросплавных предприятиях России и Казахстана показали реальную технологическую возможность производства ферросилиция ФС75 с достаточно большой заменой кокса углями марок Д и Б (вплоть до 100 %). Следует отметить, что испытания проведены на совре-

менных открытых ферросплавных печах мощностью от 16,5 до 25,5 МВА, ранее работавших с использованием только кокса и не совсем приспособленных для приема углей. Поэтому задача технического персонала предприятий заключалась в квалифицированном использовании положительных свойств углей и устранении явлений, связанных с их отрицательными свойствами. Судя по положительным результатам испытаний, такая задача вполне выполнима.

4. В целом при замене кокса до 80–90 % (по углероду) углями марок Д и Б получено улучшение ТЭП производства. Однако высокая замена кокса углями сопровождалась резким ростом температуры отходящих газов, что приводило к расстройству хода печей, частым остановкам их работы и тем самым к повышению удельного расхода электроэнергии.

5. Практикой показано, что при каждом промышленном испытании совершенствуется тех-

нология выплавки ферросилиция с применением углей взамен кокса. Идет процесс неуклонного стремления к их максимальному использованию, что обусловлено благоприятными физико-химическими свойствами углей как углеродистых восстановителей и особенно их дешевизной. Это позволяет при оптимальном количестве углей в шихте улучшить ТЭП работы печей и получить ощутимую прибыль.

6. В настоящее время на современных открытых печах при выплавке ферросилиция ФС75 уже достигнут уровень гарантированного использования длиннопламенных и бурых углей взамен кокса до 80–90 % (по углероду). Это свидетельствует о скором приближении периода бескоксового производства ферросплавов, особенно высококремнистых.

7. Для перехода на бескоксовое производство кремнистых ферросплавов на существующих печах необходимо внести определенные изменения в режим их эксплуатации, а именно:

- стабилизировать “высокое” напряжение и электрический режим плавки;
- увеличить фазовое напряжение на электродах;
- снижать избыток углерода;
- изменить конструкцию зонта;
- повысить производительность дымососов и фильтровальную поверхность рукавных фильтров на газоочистках;
- оптимизировать гранулометрический состав углей с поставкой класса 25–100 мм;
- вести поиск новых углей с благоприятным минеральным составом (по содержанию алюминия и кальция).

Другим способом достижения прогресса в использовании углей может быть строительство новых печей и газоочисток, адаптированных к высокой температуре и большому количеству отходящих газов при 100 %-ной замене кокса углями с высоким выходом летучих веществ (марок Б и Д).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мизин В.Г., Серов Г.В. Углеродистые восстановители для ферросплавов. — М.: Металлургия, 1976. — 272 с.
2. Кашлев И.М., Канаев Ю.П., Якушевич Н.Ф., Страхов В.М. Использование каменных углей в качестве углеродистого восстановителя при выплавке ферросилиция // Вестник горно-металлургической секции АЕН РФ. Отделение металлургии. Сб. научных трудов СибГИУ. Вып. 2. — Новокузнецк, 1999. С. 21–28.
3. Павлов С.Ф., Кашлев И.М., Гуменный В.Ф., Чашин Г.А. Повышение эффективности плавки ферросилиция // Сталь. 2002. № 6. С. 35–38.
4. Святков Б.А., Головачев Н.П., Платонов В.Ю. и др. Использование углей Кузнецкого угольного бассейна при производстве ферросплавов на Аксуском заводе ферросплавов // Физико-химические и технологические вопросы металлургического производства Казахстана. Сб. трудов Химико-металлургического института им. Ж. Абишева. — Алматы: Искандер, 2002. Кн. 2. С. 335–340.
5. Головачев Н.П., Едильбаев И.Б., Худов С.И. и др. Производственная оценка использования углей при производстве высокопроцентного ферросилиция // Компьютерное моделирование при оптимизации технологических процессов электротермических производств: сб. докладов научно-технич. конф. “Электротермия-2004”. — Санкт-Петербург, 2004. С. 191–200.
6. Страхов В.М., Кашлев И.М. Выплавка ферросилиция с повышенной долей замены кокса углем // Актуальные проблемы рудной и химической электротермии. Сб. трудов всерос. научно-технич. конф. “Электротермия”. — Санкт-Петербург, 2012. С. 31–42.
7. Страхов В.М., Динельт В.М., Мизин В.Г. К вопросу о новом подходе и оценки качественных показателей углеродистых восстановителей для электротермических производств // Применение современных физико-химических и металлургических методов исследования процессов и продуктов твердых горючих ископаемых: сб. трудов научно-технич. конф. — Новокузнецк, 1971. С. 40–45.
8. Страхов В.М., Фешкова И.В., Рябиченко А.Д. и др. Качество коксового орешка в современных условиях его производства // Кокс и химия. 1988. № 9. С. 26–30.
9. Канаев Ю.П., Страхов В.М. Металлургические характеристики коксового орешка как углеродистого восстановителя // Совершенствование производства ферросилиция. Вып. 3. Материалы заводской научно-технич. конф. — Новокузнецк, 1997. С. 173–177.
10. Нефедов П.Я. О требованиях к качеству углеродистых восстановителей для процессов рудной электротермии // Кокс и химия. 2000. № 8. С. 24–32.
11. Страхов В.М. Взаимосвязь реакционной способности кокса с основными показателями выплавки ферросилиция // Кокс и химия. 1998. № 11–12. С. 17–21.
12. Воробьев В.П., Вяхирева Л.Д. Физико-химические свойства углеродистых восстановителей в электротермических процессах // Известия АН СССР. Металлы. 1983. № 5. С. 28–30.
13. Грязнов Н.С., Нечаева Г.И., Сухоруков В.И. Особенности формирования физико-химических свойств кокса // Кокс и химия. 1973. № 4. С. 13–18.
14. Страхов В.М., Матвиенко В.А., Тимофеев Г.Д. и др. Исследование бурого угля Майкюбенского бассейна как углеродистого восстановителя при выплавке ферросплавов // Кокс и химия. 1998. № 9. С. 17–21.
15. Страхов В.М., Калиакпаров А.Г., Головачев Н.П. и др. Роль газовой фазы длиннопламенного угля в восстановительных процессах выплавки ферросилиция // Технология и оборудование руднотермических производств. Сб. трудов всерос. научно-технич. конф. “Электротермия 2008”. — Санкт-Петербург, 2008. С. 241–249.

16. Жилияков С.С., Чашин Г.А., Снитко Ю.П. и др. Опыт использования углеродистых восстановителей при производстве ферросилиция на ОАО “Кузнецкие ферросплавы” // 8-й Междунар. конгресс ферросплавщиков JNFACON, Китай, 1998. С. 10–12.
17. Страхов В.М., Гайдученко Н.С., Нестеренко А.И. и др. Использование тощих кузнецких углей в агломерационном и ферросплавном производстве // Кокс и химия. 1978. № 9. С. 19–26.
18. Нефёдов П.Я., Страхов В.М., Гайдученко Н.С. и др. Использование каменных углей при выплавке ферросплавов // Сб. “Повышение качества и эффективности производства ферросплавов”. — М.: Черметинформация, 1979. С. 55–57.
19. Серов Г.В., Уканакоев П.М., Кошкин Г.А. и др. Применение тощего угля Кузбасса в качестве восстановителя при выплавке ферросилиция // Сб. “Пути совершенствования технологии производства и повышения качества кокса кузнецких углей”. — Новокузнецк, 1975. С. 85–87.
20. Нефёдов П.Я., Страхов В.М. Тощие угли Кузбасса — заменители кокса // Кокс и химия. 2006. № 6. С. 23–34.
21. Страхов В.М. Использование качественного потенциала антрацита Горловского бассейна в металлургических производствах // Кокс и химия. 2008. № 9. С. 27–37.
22. Калиакпаров А.Г., Суслов А.В., Страхов В.М. Промышленное использование антрацита с низким содержанием фосфора в производстве высокоуглеродистого феррохрома // Кокс и химия. 2014. № 6. С. 23–27.
23. Канаев Ю.П., Трегуб В.В., Молчанов Н.Е. и др. Разработка технологии использования слабоспекающихся углей при выплавке ферросилиция // Совершенствование технологии производства ферросилиция. Вып. 3. Сб. материалов заводской научно-технич. конф. — Новокузнецк, 1997. С. 191–196.
24. Канаев Ю.П., Молчанов Н.Е., Снитко Ю.П. и др. Совершенствование технологии выплавки ферросилиция с использованием каменных углей марки СС // Сталь. 2000. № 1. С. 32–34.
25. Пат. 2236481 РФ, МПК⁷ С 22С 33/04. Восстановительная смесь для выплавки ферросплавов / В.М. Страхов, Ю.П. Канаев, И.М. Кашлев и др. // Заявл. 10.10.2002; опубл. 20.09.2004. Бюл. № 26.
26. Волинкина Е.П., Школлер М.Б., Белихмаер Я.А. Особенности пиролиза кусковых углей в условиях металлургических процессов // Кокс и химия. 1991. № 7. С. 2–5.
27. Волинкина Е.П., Селезнев Ю.А. Принципы критериальной оценки углей для конвертерного производства стали // Изв. вузов. Черная металлургия. 2005. № 4. С. 44–49.
28. Нижегородова Т.Е., Симонов В.К., Праздник А.И. и др. Восстановление железорудных материалов летучими продуктами термического разложения бурых углей // Сб. “Физико-химия прямого получения железа”. — М.: Наука, 1977. С. 104–108.
29. Калиакпаров А.Г., Никитин Г.М. Влияние летучих компонентов твердого топлива на процесс твердофазного восстановления железа // Сб. “Комплексное использование минерального сырья”. — Алматы, 1994. № 2. С. 84–86.
30. Никитин Г.М., Калиакпаров А.Г., Кариев А.Д. Основы технологии производства металлококса из мелкодисперсных рудных отходов при пиролизе твердого топлива // Сб. “Проблемы и перспективы развития ферросплавного производства”. — Актюбе, 2003. С. 433–436.
31. Рябчиков И.В., Мизин В.Г., Лякишев Н.П., Дубровин А.С. Ферросплавы с редко- и щелочноземельными металлами. — М.: Металлургия, 1983. — 272 с.

Поступила 30 января 2019 г.

REFERENCES

1. Mizin V.G., Serov G.V. *Uglerodistyie vosstanoviteli dlya ferrosplavov* [Carbonaceous reducing agents for ferroalloys]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 272 p. (In Russ.).
2. Kashlev I.M., Kanaev Yu.P., Yakushevich N.F., Strakhov V.M. *Ispol'zovanie kamennykh uglei v kachestve uglerodistogo vosstanovitelya pri vyplavke ferrosilitsiya* [Application of mineral carbons as a carbonaceous reducing agents for ferroalloys smelting]. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektsii AEN RF. Otdelenie metallurgii. Sb. nauchnykh trudov SibGIU* [Bulletin of the mining and metallurgical section of AEN RF. Department of metallurgy. Sat scientific works SibGIU]. Novokuznetsk, 1999, no. 2, pp. 21–28. (In Russ.).
3. Pavlov S.F., Kashlev I.M., Gumennyi V.F., Chashin G.A. Efficiency increase of ferroalloys smelting. *Stal'*, 2002, no. 6, pp. 35–38. (In Russ.).
4. Svyatov B.A., Golovachev N.P., Platonov V.Yu. etc. *Ispol'zovanie uglei Kuznetskogo ugol'nogo basseina pri proizvodstve ferrosplavov na Aksuskom zavode ferrosplavov* [Application of coals of Kuznetsk coal region at ferroalloys production at Aksu ferroalloys plant]. *Fiziko-khimicheskie i tekhnologicheskie voprosy metallurgicheskogo proizvodstva Kazakhstana. Sb. trudov Khimiko-metallurgicheskogo instituta im. Zh. Abisheva* [Physico-chemical and technological problems of metallurgical production in Kazakhstan. Sat works of the Chemical and Metallurgical Institute. J. Abishev]. Almaty: Iskander, 2002, book 2, pp. 335–340. (In Russ.).
5. Golovachev N.P., Edil'baev I.B., Khudov S.I. etc. *Proizvodstvennaya otsenka ispol'zovaniya uglei pri proizvodstve vysokoprotsentnogo ferrosilitsiya* [Production estimation of coals application during high percent ferrosilicon production]. *Komp'yuternoe modelirovanie pri optimizatsii tekhnologicheskikh protsessov elektrotermicheskikh proizvodstv: sb. dokladov nauchno-tekhnich. konf. "Elektrotermiya-2004"* [Computer modeling in the optimization of technological processes of electrothermal production: Sat. reports of scientific and technical. conf. “Electrothermia-2004”]. St-Peterburg, 2004, pp. 191–200. (In Russ.).
6. Strakhov V.M., Kashlev I.M. *Vyplavka ferrosilitsiya s povyshennoi dolei zameny koksa uglem* [Ferrosilicon smelting with increased share of coke substitution by coal]. *Aktual'nye problemy rudnoi i khimicheskoi elektrotermii. Sb. trudov vseros. nauchno-tekhnich. konf. "Elektrotermiya"* [Actual problems of ore and chemical electrothermia. Sat works of All-Russia scientific and technical conf. “Electrothermia”]. St-Peterburg, 2012, pp. 31–42. (In Russ.).
7. Strakhov V.M., Dinel't V.M., Mizin V.G. *K voprosu o novom podkhode i otsenki kachestvennykh pokazatelei uglerodistykh vosstanovitelei dlya elektrotermicheskikh proizvodstv* [About new approach and estimation of quality indices of carbonaceous reducing agents for electro-thermal production]. *Primenenie sovremennykh fiziko-khimicheskikh i metallotermicheskikh metodov issledovaniya protsessov i produktov tverdykh goryuchikh iskopaemykh: sb. . trudov nauchno-tekhnich. konf.* [The use of modern physicochemical and metallothermic methods for studying the processes and

- products of solid fossil fuels: Collection of works of scientific and technical conf.] Novokuznetsk, 1971, pp. 40–45. (In Russ.).
8. Strakhov V.M., Feshkova I.V., Ryabichenko A.D. etc. Quality of coke nuts under the modern conditions of its production. *Koks i khimiya*, 1988, no. 9, pp. 26–30. (In Russ.).
 9. Kanaev Yu.P., Strakhov V.M. *Metallurgicheskie kharakteristiki koksovogo oreshka kak uglerodistogo vosstanovatelya* [Metallurgical characteristics of coke nuts as a carbonaceous reducing agent]. *Sovershenstvovanie proizvodstva ferrosilitsiya. Materialy zavodskoi nauchno-tekhnich. konf.* [Improving the production of ferrosilicon. Sat. materials scientific and technical. conf.] Novokuznetsk, 1997, no. 3, pp. 173–177. (In Russ.).
 10. Nefedov P.Ya. About requirements to quality of carbonaceous reducing agents for the processes of ore electrothermics. *Koks i khimiya*, 2000, no. 8, pp. 24–32. (In Russ.).
 11. Strakhov V.M. Interconnection of coke reaction ability with main indices of ferrosilicon. *Koks i khimiya*, 1998, no. 11, pp. 17–21. (In Russ.).
 12. Vorob'ev V.P., Vyakhireva L.D. Physical and chemical properties of carbonaceous reducing agents in electrothermics processes. *Izvestiya AN SSSR. Metally*, 1983, no. 5, pp. 28–30. (In Russ.).
 13. Gryaznov N.S., Nechaeva G.I., Sukhorukov V.I. Peculiarities of forming physical and chemical properties of coke. *Koks i khimiya*, 1973, no. 4 pp. 17–18. (In Russ.).
 14. Strakhov V.M., Matvienko V.A., Timofeev G.D. etc. Study of the Majkyubensk region brown coal as a carbonaceous reducing agents at ferroalloys smelting. *Koks i khimiya*, 1998, no. 9 pp. 17–21. (In Russ.).
 15. Strakhov V.M., Kaliakparov A.G., Golovachev N.P. etc. *Rol' gazovoi fazy dlinnoplamennogo uglya v vosstanovitel'nykh protsessakh vyplavki ferrosilitsiya* [The role of the long-flame gas phase in reducing processes of ferrosilicon smelting]. *Tekhnologiya i oborudovanie rudnotermicheskikh proizvodstv. Sb. trudov vseros. nauchno-tekhnich. konf. "Elektrotermiya 2008"* [Technology and equipment of ore-thermal production. Sat works of All-Russia scientific and technical conf. "Electrothermia 2008"]. St-Peterburg, 2008, pp. 241–249. (In Russ.).
 16. Zhilyakov S.S., Chashin G.A., Snitko Yu.P. etc. *Opyt ispol'zovaniya uglerodistykh vosstanovitelei pri proizvodstve ferrosilitsiya na OAO "Kuznetskie ferrosplavy"* [Experience of carbonaceous reducing agents application at ferrosilicon production at OJSC "Kuznetskie ferrosplavy"]. *8-i Mezhdunar. kongress ferrosplavshchikov JNFACON* [8th Intern. Ferroalloy Congress JNFACON]. China, 1998, pp. 10–12.
 17. Strakhov V.M., Gaiduchenko N.S., Nesterenko A.I. etc. Application of lean coals in sintering and ferroalloys production. *Koks i khimiya*, 1978, no. 9, pp. 19–26. (In Russ.).
 18. Nefedov P.Ya., Strakhov V.M., Gaiduchenko N.S. etc. *Ispol'zovanie kamennykh uglei pri vyplavke ferrosplavov* [Application of mineral carbon at ferroalloys]. *Sb. "Povyshenie kachestva i effektivnosti proizvodstva ferrosplavov"* [Sat. works "Improving the quality and efficiency of production of ferroalloys"]. Moscow: Chermetinformatsiya, 1979, pp. 55–57. (In Russ.).
 19. Serov G.V., Ukanakov P.M., Koshkin G.A. etc. *Primenenie toshchego uglya Kuzbassa v kachestve vosstanovatelya pri vyplavke ferrosilitsiya* [Application of lean coals of Kuzbass as a reducing agent at ferrosilicon smelting]. *Sb. "Puti sovershenstvovaniya tekhnologii proizvodstva i povysheniya kachestva koksa kuznetskikh uglei"* [Sat. works "Ways to improve the production technology and improve the quality coke of coal Kuznetsk"]. Novokuznetsk, 1975, pp. 85–87. (In Russ.).
 20. Nefedov P.Ya., Strakhov V.M. Lean coals of Kuzbass – substitution – of coke. *Koks i khimiya*, 2006, no. 6, pp. 23–34. (In Russ.).
 21. Strakhov V.M. Application of quality potential of anthracite of Gorlovka region in metallurgical production. *Koks i khimiya*, 2008, no. 9, pp. 27–37. (In Russ.).
 22. Kaliakparov A.G., Suslov A.V., Strakhov V.M. Industrial application of anthracite with low phosphor content in production high-carbon ferrochrome. *Koks i khimiya*, 2014, no. 6, pp. 23–27. (In Russ.).
 23. Kanaev Yu.P., Tregub V.V., Molchanov N.E. etc. *Razrabotka tekhnologii ispol'zovaniya slabospekayushchikhsya uglei pri vyplavke ferrosilitsiya* [Elaboration of a technology of low sintering coals application at ferrosilicon smelting]. *Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva ferrosilitsiya. Sb. materialov zavodskoi nauchno-tekhnich. konf.* [Improving the production of ferrosilicon. Sat. Materials scientific and technical. conf.]. Novokuznetsk, 1997, no. 3, pp. 191–196. (In Russ.).
 24. Kanaev Yu.P., Molchanov N.E., Snitko Yu.P. etc. Perfection of the ferrosilicon smelting technology with application of mineral carbons of SS grade. *Stal'*, 2000, no. 1, pp. 32–34. (In Russ.).
 25. Strakhov V.M., Kanaev Yu.P., Kashlev I.M. etc. *Vosstanovitel'naya smes' dlya vyplavki ferrosplavov* [Reducing mixture for ferroalloys smelting]. Patent RF no. 2236481. IPC C 22C 33/04. *Byulleten' izobretenii*, 2004, no. 26. (In Russ.).
 26. Volynkina E.P., Shkoller M.B., Belikhmaer Ya.A. Peculiarities of lump coals pyrolysis under conditions of metallurgical production. *Koks i khimiya*, 1991, no. 7, pp. 2–5. (In Russ.).
 27. Volynkina E.P., Seleznev Yu.A. Principles of criterial coal estimation for BOF steel production. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 2005, no. 4, pp. 44–49. (In Russ.).
 28. Nizhegorodova T.E., Simonov V.K., Prazdnik A.I. etc. *Vosstanovlenie zhelezorudnykh materialov letuchimi produktami termicheskogo razlozheniya burykh uglei* [Reducing of iron ore materials by volatile products of thermal decomposition of brown coals]. *Sb. "Fiziko-khimiya pryamogo polucheniya zheleza"* [Sat. "Physical chemistry of direct production of iron"]. Moscow: Nauka, 1977, pp. 104–108. (In Russ.).
 29. Kaliakparov A.G., Nikitin G.M. *Vliyanie letuchikh komponentov tverdogo topliva na protsess tverdogaznogo vosstanovleniya zheleza* [Influence of solid fuel volatile components on the process of solid-phase iron reducing]. *Sb. "Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya"* [Sat. "Complex use of mineral raw materials"]. Almaty, 1994, no. 2, pp. 84–86. (In Russ.).
 30. Nikitin G.M., Kaliakparov A.G., Kariev A.D. *Osnovy tekhnologii proizvodstva metallokoksa iz melkodispersnykh rudnykh otkhodov pri pirolize tverdogo topliva* [Fundamentals of the technology of metallurgical coke production of fine ore wastes at solid fuel pyrolysis]. *Sb. "Problemy i perspektivy razvitiya ferrosplavnogo proizvodstva"* [Sat. "Problems and prospects of development of ferroalloy production"]. Aktoke, 2003, pp. 433–436. (In Russ.).
 31. Ryabchikov I.V., Mizin V.G., Lyakishev N.P., Dubrov A.S. *Ferrosplavy s redko- i shchelochnozemel'nymi metallami* [Ferroalloys with rare earth and alkali-earth metals]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 272 p. (In Russ.).

Received 30 January 2019