

УДК 669.168.3:669.713.6

А.Ю. Таран, А.Н. Овчарук, В.В. Кривенко, И.В. Цветков,  
В.И. Ольшанский, И.Ю. Филиппов

### ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРОСИЛИКОАЛЮМИНИЯ

*Анотація. Розроблена, досліджена та відпрацьована в лабораторних і напівпромислових умовах технологія електротермічної виплавки ферросилікоалюмінії з використанням продуктів переробки абразивних матеріалів. У якості шихтових компонентів застосовувалися: «стара шихта» виробництва карбиду кремнію, шлами абразивного електрокорунду і карбиду кремнію, магнітна фракція виробництва електрокорунду і газове вугілля. В результаті отримано сплав, який містить 61-69% Al + Si.*

*Ключові слова ферросилікоалюмінії, електротермія, комплексний розкислювач, ресурсозбереження, вторинні матеріали абразивного виробництва*

*Аннотация. Разработана, исследована и отработана в лабораторных и полупромышленных условиях технология электротермической выплавки ферросилікоалюминия с использованием продуктов переработки абразивных материалов. В качестве шихтовых компонентов применялись: «старая шихта» производства карбида кремния, шламы абразивного электрокорунда и карбида кремния, магнитная фракция производства электрокорунда и газовый уголь. В результате получен сплав содержащий 61–69% Al+Si.*

*Ключевые слова ферросилікоалюминий, электротермия, комплексный раскислитель, ресурсосбережение, вторичные материалы абразивного производства*

*Annotation. Designed, studied and worked in the laboratory and semi-industrial conditions electrothermal smelting technology of ferrosilicoaluminum using recyclable abrasive materials. As the raw ingredients used, "the old batch" of silicon carbide production, slurries of corundum and silicon carbide, magnetic fraction of corundum production and a gas coal. The result is an alloy containing 61-69% Al + Si.*

*Keywords ferrosilicoaluminum, electrothermics, complex deoxidizer, resource-saving, recyclable abrasive materials*

#### Введение

Будучи одним из наиболее эффективным раскислителей, алюминий широко применяется в сталеплавильном производстве для окончательного раскисления металла. [1] Алюминий используют в виде чушек чистого или вторичного металла. При этом в первом случае дороговизна раскислителя значительно сказывается на себестоимости продукции, а во втором – в сталь попадает значительное количество примесей цветных металлов (Zn, Sn, Cu, Pb, As), в конечном итоге ухудшающих ее качество [2]. Кроме того, при введении в сталь, 70–90% алюминия окисляется под действием воздуха и шлака, а количество, попадающее в металл и выполняющее свою прямую функцию, трудно прогнозируемо. Несмотря на недостатки, отказываться от алюминия по ряду причин не целесообразно, поэтому становятся актуальными исследования, направленные на замену первичного и вторичного алюминия его сплавами с другими элементами. Выполнение операций по доводке стали с помощью комплексных раскислителей позволяет сократить их расход, улучшить кинетику раскисления, снизить расход тепла на их растворение, улучшить качество

обрабатываемого металла [3]. Наиболее универсальным и перспективным в этом плане, может быть комплексный раскислитель – ферросиликоалюминий.

Ферросиликоалюминий можно получать в промышленных объемах двумя способами: методом смешения и путем совместного восстановления оксидов алюминия и кремния углеродом в рудовосстановительных печах [1]. Метод смешения хотя и позволяет получать комплексные сплавы сложного состава, но экономически не выгоден из-за высокого угара элементов. Кроме того остается проблема использования металлического алюминия.

В свете вышеизложенного наиболее перспективной выглядит электротермическая технология производства комплексных алюминиевых и алюмокремниевых ферросплавов, разработанная и совершенствуема кафедрой электрометаллургии Национальной металлургической академии Украины на протяжении многих лет [4].

### Сырьевая база

Несмотря на очевидные преимущества, данная технология в Украине не находит развития. Основной причиной сложившейся ситуации является отсутствие надежной сырьевой базы. В Казахстане, например, производство ферросиликоалюминия активно расширяется [5] за счет использования высокозольных углей Экибастузского месторождения, представляющих собой практически готовую моношихту для выплавки ферросиликоалюминия [6].

Анализ отечественной минерально-сырьевой базы показал, что в качестве рудной части шихты для электротермического производства ферросиликоалюминия возможно использование алюмосиликатных пород: бокситов, глин, первичных и вторичных каолинов, кианиты, силлиманиты и пр. Имеющиеся месторождения этих видов сырья [7], либо не разрабатываются, либо используются для производство электролитического алюминия, электрокорунда, огнеупоров, керамики и т.д.

Наиболее перспективным природным сырьем для выплавки ферроалюминия и ферросиликоалюминия в Украине являются бокситы. Крупнейшее месторождение в Украине – Высокопольское, представленное гиббситовыми бокситами (33–45%  $Al_2O_3$ , 5–9%  $SiO_2$ , 26–32%  $Fe_2O_3$ , 1,9–2,3%  $TiO_2$ , 0,1–0,18 CaO), разведанные запасы – 19 млн.т. [8] Высокопольский боксит обладает низкими показателями по содержанию  $Al_2O_3$ , кремниевому и кальциевому модулям, поэтому отечественные производители не используют такое сырье непосредственно для получения глинозема, тем более, когда есть возможность приобретения за границей высококачественного. В то же время для производства комплексных ферросплавов никаких ограничений по использованию этого сырья нет. В свое время были проведены исследования возможности выплавки из предварительно агломерированного Высокопольского боксита ферросиликоалюминия [9], однако дальнейшего развития эта технология у нас в стране не получила.

Для решения проблемы дефицита сырья рассмотрена возможность использования техногенных вторичных материалов абразивного производства, содержащих соединения алюминия, кремния и углерода.

При выплавке абразивного электрокорунда электрофильтрами и системой механической очистки улавливается пыль, химического состава, %:

$Al_2O_3$	$SiO_2$	$Fe_2O_3$	$TiO_2$	C	$K_2O$	$Na_2O$	CaO
32–37	15–20	8–10	1–2	40–42	3–4	1–1,5	0,15–0,30

Размер частиц пыли <160 мкм.

В процессе переработки куска выплавляемого абразивного электрокорунда на шлифовальные материалы после целого комплекса технологических операций (дробление, мокрое измельчение, обезвоживание, сушка) он подвергается первичному магнитному обогащению. Выведенный из технологической схемы магнитный материал представлен конгломератом, состоящим из попутного низкремнистого ферросилиция и абразивного электрокорунда. Содержание каждого материала зависит от условий ведения плавки («на блок» или «на выпуск»), выбранной схемы дробления и может колебаться в значительных пределах: содержание корунда, например, может изменяться от 50 до 70%. Наиболее вероятный состав магнитного материала представлен в табл.1.

Таблица 1

Фракционный и химический состав магнитного материала электрокорундового производства

Крупность материала, мкм/%										
1250	1000	800	630	500	400	315	250	200	160	-160
12,2	8,0	12,5	9,0	12,0	7,0	9,0	7,0	6,1	7,4	9,8
Массовая доля компонентов, % мас.										
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al	Ti	Si	Fe	C		
51,4	0,6	0,5	3,1	0,4	0,6	5,1	34,9	0,7		

При производстве шлифовальных материалов из карбида кремния при мокром измельчении исходного куска в шаровых мельницах образуются шламы, содержащие не менее 80% SiC, около 5% свободного углерода, до 14% SiO<sub>2</sub> и 2–3% Fe. В этом же производстве регулярно из технологической схемы выводится так называемая «старая шихта», содержащая до 20% SiC, около 50% SiO<sub>2</sub>, более 25% C и вредные для абразивного производства 3–4% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1,5–2,0% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, до 1% CaO. В зимнее время шламы, образующиеся при производстве шлифовальных материалов из абразивного электрокорунда и карбида кремния, при транспортировке их на фильтроочистные сооружения смешиваются, и имеет следующий состав: 50–58% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4–5% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 20–25% SiO<sub>2</sub>, 5–6% SiC, 5–6% C.

В основном перечисленные материалы представлены элементами, необходимыми для ферросиликоалюминия (Si, Al, Fe, C) с незначительным количеством примесей (Ca, Ti), которые не представляют опасности для готового сплава. Это подтверждает возможность вовлечение их в производство.

#### Карбид кремния в составе шихты

Техногенные материалы абразивного производства в значительном количестве содержат карбид кремния. Будучи комплексным восстановителем, это соединение способно оказывать ощутимый положительный эффект на выплавку ферросиликоалюминия. Реакции восстановления оксидов кремния и алюминия карбидом кремния и углеродом и затраты тепла по ним приведены в табл.2.

Таблица 2

Реакции восстановления оксидов кремния и алюминия

Реакция	$\Delta G^0_T = \Delta H^0 - T\Delta S^0$	$\frac{kJ}{\text{моль Si(Al)}}$	$\frac{MJ}{\text{кг Si(Al)}}$
SiO <sub>2</sub> + 2SiC = 3[Si] + 2CO	$\Delta G^0_T = 823796 - 320,83T$	274,6	9,81
SiO <sub>2</sub> + 2C = [Si] + 2CO	$\Delta G^0_T = 689818 - 353,91T$	689,8	24,64
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + SiC = 2[Al] + SiO <sub>2</sub> + CO	$\Delta G^0_T = 723814 - 171,57T$	361,9	13,40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 3C = 2[Al] + 3CO	$\Delta G^0_T = 1346643 - 542,02T$	673,3	24,94

Как видно из приведенных расчетов, в случае использования SiC в роли восстановителя вместо углерода, ожидается снижение расхода тепла, на восстановления кремния в 2,5 раза, алюминия – 1,8 раза. Таким образом использование карбида кремния в качестве восстановителя способно существенно снизить расход электроэнергии на выплавку ферросиликоалюминия. Сам по себе металлургический карбид кремния является очень ценным и дорогим материалом, что лишний раз указывает на целесообразность его использования в составе техногенного сырья абразивного производства, которое в существующем виде не находит применения в промышленности.

#### Опытные плавки ферросиликоалюминия

С целью разработки рациональной технологии получения ферросиликоалюминия были проведены опытные плавки на печи Таммана с использованием различных сочетаний шихтовых материалов. Характеристика исходного сырья приведена в табл.3. Исследуемую шихту нагревали с одинаковой скоростью, при этом фиксировали температуру и массу шихты. Каждую шихту нагревали до 1800°C. Исходя из потерянной массы, была рассчитана степень восстановления той или иной шихты. Результаты опытных плавки приведены в табл.4.

Таблица 3

Химический состав шихтовых материалов для производства ферросиликоалюминия

Материал	Содержание компонентов, %									
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	Si	Fe	SiC	C	ППП
Боксит	38,4	4,7	32,4	3,5	–	–	–	–	–	21
Кварцит	0,52	97,5	0,63	–	0,9	–	–	–	–	–
Антрацит	1,329	2,528	0,475	–	0,147	–	–	–	95	–
Шламы производства электрокорунда и карбида кремния	56,82	1,9	4,4	1,57	–	–	–	25,51	8,4	–
Отходы производства SiC – старая шихта	2,7	50,57	2,6	–	–	–	0,03	21,4	22	–
Магнитная фракция – продукт переработки куска электрокорунда	54,1	0,6	0,5	3,1	–	5,1	34,9	–	0,7	–

Степень восстановления шихт, содержащих вторичные материалы, оказалась значительно выше, что связано с наличием в них как уже восстановленных, металлических фаз, так и комплексного восстановителя – карбида кремния. Это сырье представляет значительный интерес и находит, на данный момент, широкое применение в металлургическом и литейном производствах. Исследование физико-химических и металлургических свойств карбидокремниевых материалов как восстановителей, особенно в электрометаллургии ферросплавов, является актуальной задачей для повышения эффективности производства.

Таблиця 4

Показатели опытных плавов ферросиликоалюминия в печи Таммана

Показатель	Шихта		
	1	2	3
Содержание компонента шихты, %			
Боксит	44,3	–	47,75
Кварцит	36,25	–	–
Антрацит	19,45	–	2,55
Шламы	–	10	–
Отходы SiC	–	55	49,7
Магнитная фракция	–	35	–
Длительность плавки, мин	25	28	27
Расчетная масса металла, г	13,35	20,53	16,55
Масса полученного металла, г	9,31	19,57	13,49
Доля восстановившегося металла, %	69,74	95,32	81,51
Состав металла, %:			
Al	14,97	17,12	12,13
Si	28,65	45,97	42,47
Ti	1,07	1,18	0,83
Al+Si	43,62	63,09	54,6

#### Экспериментальные исследования выплавки ферросиликоалюминия с применением в качестве восстановителя карбидокремния

Выплавка сплава производили в лабораторной электропечи мощностью 250 кВА с электродами диаметром 100 мм. Ванна печи имела диаметр 450 мм, глубину 240 мм. Выплавку производили на ступени напряжения в 49 В и силе тока 1–2 кА.

Было проведено 23 плавки и в целом за кампанию выплавлено 299 кг сплава. Оценку процесса выплавки ферросиликоалюминия производили по 10 плавкам (№ 10-19), при проведении которых были минимальные нарушения технологического режима. По результатам этих плавов посчитаны производительность печи, удельный расход электроэнергии и другие технологические показатели. Результаты опытных плавов представлены в табл.5.

В процессе всей опытной кампании, корректировка шихты не проводилась. На плавку загружали 50 кг брикетированной шихты, а длительность плавки, в среднем, не превышала двух часов.

При постоянном количестве загружаемой шихты на плавку имело место отклонение среднечасового съема электроэнергии от средней величины за кампанию (от 32,3 до 40,5 кВт·ч, при среднем значении 36,82 кВт·ч). Такая работа печи сказалась и на прочих показателях: производительность печи колебалась от 3,71 кг/ч до 7,93 кг/ч, удельный расход электроэнергии от 4914 до 8889 кВт·ч/т. По этой же причине колебался химический состав продуктов плавки: содержание алюминия изменялось от 7,92 до 15,14, а кремния от 58,77 до 51,42% (табл.6). В то же время сумма алюминия и кремния в сплаве колебалась незначительно. Указанная нестабильность среднечасового съема электроэнергии вызвана в основном конструктивной особенностью печного агрегата: различное расстояние между электродами, несовершенство леточного узла (из-за которого

время вскрытия летки неоправданно увеличивалось), слабый контакт графитированного электрода в электрододержателе, приводили к проскальзыванию электрода и вынужденным простоям.

Таблица 5

Показатели опытных плавов ферросиликоалюминия в электропечи мощностью 250 кВА

№ плавки	Длительность плавки, ч	Загружено брикетов, кг	Масса плавки, кг	Расход эл/энергии на плавку, кВт·ч	Удельный расход эл/энергии, кВт·ч/т	Производительность, кг/ч	Среднечасовой съем эл/энергии, кВт·ч
10	1,58	50	11,0	64	5818	6,96	40,5
11	1,33	50	10,5	56	5333	7,89	42,1
12	1,48	50	7,2	52	7222	4,86	35,1
13	1,70	50	6,3	56	8889	3,71	32,9
14	2,08	50	16,5	83,2	5042	7,93	40,0
15	2,08	50	10,5	67,2	6400	5,05	32,3
16	1,92	50	15,0	65,6	4373	7,81	34,1
17	1,92	50	14,0	68,8	4914	7,29	35,8
18	2,00	50	12,1	72	5950	6,05	36,0
19	2,13	50	15,0	84	5600	7,04	39,4
Среднее значение	1,82	50	11,81	66,9	5954	6,49	36,8

Процесс выплавки ферросиликоалюминия был практически бесплаковым, содержание алюминия и кремния были очень близки к расчетным (в отдельных плавках даже соответствовало планируемому). В отдельных плавках извлечение алюминия составило 79,5%, а кремния 71%.

Таблица 6

Химический состав продуктов плавки

№ плавки	Al	Si	Fe	Ca	C	P	S	Al+Si
10	11,97	53,13	34,31	0,21	0,34	0,044	0,026	65,10
11	13,69	55,24	30,27	0,41	0,35	0,044	0,004	68,93
12	12,03	56,97	30,42	0,21	0,33	0,032	0,003	69,00
13	10,82	58,03	30,71	0,21	0,19	0,027	0,002	68,85
14	7,92	58,77	32,77	0,21	0,25	0,046	0,016	66,69
15	10,03	56,72	32,62	0,11	0,38	0,039	0,102	66,75
16	10,67	50,09	38,63	0,11	0,40	0,035	0,037	60,76
17	10,38	51,48	37,67	0,11	0,29	0,034	0,038	61,86
18	9,16	54,27	36,47	0,06	0,04	0,018	0,003	63,43
19	15,14	51,42	32,71	0,11	0,58	0,008	0,031	66,56

Расход брикетов составил 4234 кг на тонну сплава, в том числе старой шихты карбида кремния – 2530 кг, шламов абразивного электрокорунда и карбида кремния – 616 кг, магнитного материала – 873 кг, газового угля – 215 кг. Удельный расход электроэнергии составил 10860 кВт·ч/т.

### Выводы

Разработана, исследована и отработана в лабораторных и полупромышленных условиях (более 46 часов непрерывной работы электропечи) технология выплавки ферросиликоалюминия с использованием вторичных материалов абразивного производства.

Доказана возможность утилизации техногенного сырья, не находящего до сих пор применение, и производства конкурентоспособного и качественного комплексного раскислителя. Эта схема, являясь ресурсосберегающей, позволяет решать вопросы, связанные с необходимостью комплексного использования в народном хозяйстве ценного и дефицитного минерального сырья и охраны окружающей среды.

Наличие в шихте карбида кремния и металлического железа позволили значительно улучшить условия протекания восстановительных процессов, что позволило, по сравнению с действующими технологическими схемами, на 30% снизить удельный расход электроэнергии.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Электроплавка алюмосиликатов. Гасик М. И., Емлин Б. И. – М.: Металлургия. 1971. – 304 с.
2. Внепечная обработка чугуна и стали. Кудрин В. А. – М.: Металлургия. 1992. – 336 с.
3. Металлургия стали. Кудрин В. А. – М.: Металлургия. 1989. – 560 с.
4. Физикохимия и технология электроферросплавов: Учебник для вузов / М. И. Гасик, Н. П. Лякишев. – Днепропетровск: Системные технологии, 2005. – 448 с.
5. М.Ж.Толымбеков. Перспективы расширения производства ферросиликоалюминия в Казахстане \ IV Международная научно-техническая конференция УкрФА «Ключевые вопросы развития электрометаллургической отрасли». Киев, 20–21 апреля, 2011 г. – С. 42–48.
6. Получение комплексных ферросплавов из минерального сырья Казахстана / М. И. Друинский, В. И. Жучков – Алма-Ата: Наука, 1988. – 208 с.
7. Мінеральні ресурси України та світу на 01.01.2006 р. / Ю. І. Третьяков, В. І. Мартинюк, А. Г. Суботін та ін. // Державне науково-виробниче підприємство «Геоінформ України». – Київ 2007. – 560 с.
8. Характеристика бокситов Высокопольского месторождения и анализ традиционных способов его обогащения / А. Н. Овчарук, А. Ю. Таран, В. К. Руденко, М. И. Гасик // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2008. – № 6. – С. 22–26.
9. Емлин Б.И., Манько В.А., Друинский М.И. и др. Выплавка ферросиликоалюминия из агломерированного боксита // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 1973. – №10. – С.903–904.