



УДК: 621.745.5:546.881

ПОВЕДЕНИЕ ВАНАДИЯ ПРИ ЖИДКОФАЗНОЙ ПЛАВКЕ ВАНАДИЙСОДЕРЖАЩЕГО КОНЦЕНТРАТА

**В. Н. Костяков, Е. Б. Полетаев,
Г. М. Григоренко, С. Н. Медведь**

Исследовано получение феррованадия из ванадиевого концентрата в дуговой печи постоянного тока. Показано, что выплавленный металл представляет собой сплав с содержанием ванадия от 17,7 до 23,46 %, полученный при соотношении чугуна и ванадиевого концентрата в шихте 1:1. Уменьшение чугуна в шихте до 25 % обеспечивает повышение массовой доли ванадия в сплаве до 43...45 %.

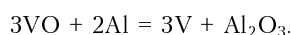
Producing of ferrovanadium from vanadium concentrate in DC arc furnace was investigated. It is shown that the melted metal represents an alloy with vanadium content from 17.7 up to 23.46 %, produced at ratio of cast iron and vanadium concentrate in charge as 1:1. The decrease of cast iron in charge down to 25 % guarantees the increase in vanadium mass share in alloy up to 43...45 %.

Ключевые слова: плавка; отходы; дуговая печь; ванадий; постоянный ток; сплав

В металлургии феррованадий получают из ванадийсодержащего сырья алюмо-, силико- или карботермическими способами [1–3].

Алюмотермическая плавка характеризуется выделением достаточно большого количества тепла вследствие протекания восстановительной реакции оксида ванадия с алюминием. Это тепло превышает теплосодержание жидких продуктов реакции, приведенной в работе [2]. Поэтому в шихту обычно вводят примерно 40 кг извести на 100 кг оксида ванадия V_2O_5 для нормального протекания процесса получения ванадийалюминиевой лигатуры [4].

Термодинамический анализ восстановительных реакций показал, что лимитирующей стадией процесса восстановления $V_2O_5 \rightarrow V$ следует считать восстановление низшего оксида VO по уравнению, приведенному в работе [2]:



Вследствие близости температур плавления оксида V_2O_5 и алюминия при их взаимодействии практически не зафиксированы так называемые низкотемпературные восстановительные процессы, определяемые взаимодействием жидкого алюминия с твердыми оксидами. По аналогии с железом и хро-

мом, высокотемпературное восстановление оксида V_2O_5 алюминием протекает в диффузионной области, а значит, наиболее медленной стадией являются процессы диффузии в шлаковой фазе.

При силикотермическом восстановлении оксида ванадия V_2O_5 выделяющегося тепла недостаточно для осуществления внепечной плавки [2]. Поэтому силикотермический феррованадий можно получать только печным способом — в электропечах с дуговым или плазменным нагревом.

Необходимо учитывать, что низшие оксиды ванадия могут вступать в реакцию с кремнеземом с образованием силикатов ванадия, из которых дальнейшее восстановление ванадия еще более затруднено [5]. Таким образом, процесс восстановления ванадия должен производиться в присутствии оксида кальция, связывающего кремнезем и препятствующий образованию силикатов ванадия.

В Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины изучено влияние вида и количества восстановителя, технологии подготовки шихты и способа ведения плавки на поведение ванадия.

Плавки проведены на жидком «болоте» чугуна в дуговой печи постоянного тока с графитовым тиглем. В качестве шихты использовали базовый чугун с содержанием (%) 3,25 C; 4,82 Si; 0,54 Mn; 0,08 Cu;



Таблица 1. Химический состав выплавленного металла

№ плавки	Массовая доля элемента, %										
	C	Si	Mn	Fe	V	Ti	Cu	Al	Cr	P	S
1*	1,12	10,63	0,11	68,3	18,42	0,11	0,56	0,19	0,46	0,019	0,0115
2**	1,58	5,58	0,07	73,28	22,24	0,02	0,30	0,62	0,56	0,016	0,0140
3**	1,29	6,50	0,08	70,27	21,25	0,11	0,14	0,05	0,44	0,008	0,0047
4***	0,87	8,03	0,12	67,06	23,46	0,18	0,05	0,07	0,15	0,010	0,0070

* Неокомкованная смесь ванадиевого концентрата, ферросилиция и известняка.
 ** Окомкованная смесь ванадиевого концентрата, ферросилиция ФС65 с дополнительным раскислением шлака ферросилицием.
 *** Неокомкованная смесь ванадиевого концентрата, алюминиевой крупки и известняка.

Таблица 2. Химический состав шлака

№ плавки	Массовая доля оксида компонента, %											
	FeO	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	TiO ₂	CuO	V ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P	S
1	0,46	0,07	45,0	0,11	0,42	0,01	3,61	1,59	47,87	0,41	0,080	0,048
2	0,05	0,17	47,92	0,23	0,70	0,03	8,47	1,32	39,42	0,29	0,063	0,066
3	0,06	0,18	45,56	0,06	0,54	0,02	7,22	1,47	40,57	0,15	0,072	0,045
4	0,24	0,36	2,38	0,11	0,084	0,01	1,06	73,75	21,18	0,25	0,063	0,066

0,06 Ti; 0,25 Cr; 0,01 Ni; 0,27 P; 0,02 S; Fe — остаточное, а также ванадиевый концентрат, состоящий из (%) 4,88 Fe₂O₃; 26,60 SiO₂; 0,13 MnO; 0,04 Al₂O₃; 0,12 CaO; 63,7 V₂O₅; 1,22 K₂O; 0,03 Cr₂O₃; 1,03 TiO₂; 0,01 CuO; 0,08 P; 0,05 S; ферросилиций ФС65, алюминиевую крупку и известняк.

Перед каждой плавкой производили подготовку шихты, включающую весовое дозирование компонентов шихты и их перемешивание с последующим окомкованием и сушкой комков в печи при температуре 280... 300 °С. В одних плавках окомкованная смесь состояла из ванадиевого концентрата и порошкообразного ферросилиция ФС65 (фракция до 1 мм), в других она дополнительно включала известняк.

При плавке неокомкованной шихты вначале загружали ванадиевый концентрат, а после его расплавления — ферросилиций или алюминиевую крупку в смеси с известняком.

При плавке окомкованной смеси (ванадиевый концентрат и восстановитель) известняк загружали в печь одновременно с окомкованным материалом. В некоторых плавках раскисляли шлак ферросилицием, вводимым в печь вместе с известняком. После выполнения всех технологических операций расплав перегревали.

В табл. 1 приведены усредненные результаты химического анализа выплавленного металла.

Из табл. 1 видно, что более высокое количество ванадия в сплаве зафиксировано при использовании в качестве восстановителя алюминия (плавка № 4). Восстановление ванадия ферросилицием также обеспечивает достаточно высокое содержание его в сплаве.

Во всех плавках обнаружено повышенное содержание кремния. При восстановлении ванадия алюминием увеличение количества кремния происходит вследствие восстановления его из шлака.

Выплавленный металл представляет собой сплав с 17,7... 23,46 % ванадия, полученный при соотношении чугуна и ванадиевого концентрата в шихте 1:1.

Уменьшение массовой доли чугуна в шихте до 25 % обеспечивает повышение концентрации ванадия в сплаве до 43... 45 %.

Химический состав шлака приведен в табл. 2.

Анализ показывает, что при восстановлении ванадия кремнием массовая доля оксида ванадия в шлаке составляет от 3,61 до 8,47 %.

При восстановлении ванадия алюминием значительно снижается количество V₂O₅ в шлаке (плавка № 4), что свидетельствует о полноте протекания восстановительных процессов при плавке концентрата.

Данные исследований позволили установить распределение ванадия в продуктах плавки (табл. 3).

Как свидетельствуют данные табл. 3, вид восстановителя оказывает заметное влияние на рас-

Таблица 3. Материальный баланс ванадия опытных плавков

№ плавки	Зона распределения ванадия, %		
	Металл	Шлак	Унос
1	84,4	9,2	7,3
2	78,5	21,5	—
3	82,6	17,4	—
4	92,2	2,2	5,6



Таблица 4. Баланс кремния плавов № 1–3

№ плавки	Расход кремния по периодам плавки, %		Статьи расхода кремния, %		
	восстановительный	диффузионного раскисления конечного шлака	Восстановление	Переход в металл	Угар
1	100	–	54,8	38,2	7,0
2	80	20	57,0	14,8	28,2
3	80	20	56,8	18,6	24,6

ределение ванадия в металле и шлаке. Так, при расплавлении неокомкованного ванадиевого концентрата в шлак переходит от 2,2 до 9,2 % ванадия, что соответствует коэффициенту распределения его в шлаке и металле 0,02 и 0,10.

Обнаружено довольно высокое содержание в шлаке ванадия при переплаве окомкованной смеси. Это объясняется тем, что в окомкованную смесь вводили 80 % кремния его общего расхода на восстановление ванадия, а 20 % кремния использовали для диффузионного раскисления шлака в конце плавки. Однако расход части восстановителя на диффузионное раскисление конечного шлака неэффективен и приводит лишь к повышенному угару кремния (табл. 4).

Коэффициент расхода кремния в восстановительный период ($K_v = \frac{G_{Si}^d}{G_{Si}^t}$, где G_{Si}^d — действительный, G_{Si}^t — теоретически необходимый расход кремния на восстановление) в плавке № 1 составлял 1,6, а в плавках № 2 и 3 — 1,4.

Полученные данные показывают, что вид восстановителя заметно влияет на энергетические показатели плавки. Так, при силикотермическом восстановлении ванадия (плавки № 1–3) основные затраты энергии приходятся на восстановительный период (65...70 % общего расхода электроэнергии на плавку), а удельные энергозатраты составляют 4,1...4,5 кВт·ч/кг.

Восстановление ванадия алюминием способствует уменьшению энергозатрат в восстановительный

период до 35 % на плавку и снижению удельного расхода электроэнергии до 1,22 кВт·ч/кг.

Выводы

1. Выполненные исследования показали, что вид восстановителя влияет на поведение ванадия и энергозатраты на плавку. Степень восстановления ванадия наиболее высокая при использовании в качестве восстановителя алюминия.

2. Показано, что энергозатраты плавки значительно снижаются при восстановлении ванадия алюминием.

3. Эффективность алюмотермической и силикотермической плавки можно оценить только на основании сравнения технико-экономических показателей плавки.

1. Дуррер Р., Фолькерт Г. *Металлургия ферросплавов*. — М.: Metallurgia, 1976. — 480 с.
2. *Ванадий в черной металлургии* / Н. П. Лякишев, Н. П. Слотвинский-Сидан, Ю. Л. Плинер, С. И. Лапко. — М.: Metallurgia, 1983. — 192 с.
3. Гасик М. И., Лякишев Н. П., Емлин Б. И. *Теория и технология производства ферросплавов*. — М.: Metallurgia, 1988. — 784 с.
4. *Алюмотермия* / Н. П. Лякишев, Ю. Л. Плинер, Г. Ф. Игнатенко и др. — М.: Metallurgia, 1978. — 424 с.
5. Рысс М. А. *Производство ферросплавов*. — М.: Metallurgia, 1975. — 336 с.

Физико-технолог. ин-т металлов и сплавов

НАН Украины, Киев

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 25.05.2006