



Рис. 2 - Зміна швидкості частинок (U_g) уздовж каналу (l).

1 - $G_g = 2 \text{ м}^3/\text{год}$; 2 - $G_g = 4 \text{ м}^3/\text{год}$; 3 - $G_g = 6 \text{ м}^3/\text{год}$; 4 - $G_g = 8 \text{ м}^3/\text{год}$

Висновок. На основі даних досліджень на лабораторній установці отримано дані, які допоможуть розвинути уявлення фізики процесу транспортування суміші реагенту для комплексного рафінування чавуну.

Список літератури

1. Soo S.L. Fluid dynamics of multi-phase systems. Toronto-London: Blaisdell. 1967.
2. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. I. – М.: Наука, 1987, 464с.

УДК 669.15

Ю. В. Костецький, М. О. Вдовін

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ

АЛЮМІНОТЕРМІЧНЕ ВІДНОВЛЕННЯ ВІДХОДІВ, ЩО МІСТЯТЬ ВАНАДІЙ, В УМОВАХ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЛАВЛЕННЯ

У зв'язку з зростаючим попитом на ферованадій, особливо в Україні, та збільшенням кількості техногенних відходів, що містять ванадій, доцільно дослідити потенціал використання цих матеріалів як сировини для видобутку ванадію [1]. Зазвичай сировиною для плавлення ферованадію є його оксиди [2-3]. Ванадій утворює кілька оксидів. Це VO , V_2O_3 , VO_2 , V_2O_5 та деякі проміжні форми. Найбільш цікавими для відновлення є V_2O_3 та V_2O_5 [4]. У техногенних відходах оксиди ванадію присутні у проду-

ктах згоряння мазуту, виробництва глинозему, титану та магнію, а також у відпрацьованих ванадієвих каталізаторах та батареях. Цей вид відходів відносно легко хімічно збагачується з 3-5% оксиду ванадію до 80-85% [5]. Прикладом є отриманий концентрат з наступним фазовим складом оксиду ванадію: V_2O_5 55-65%, V_2O_3 15-20%, VO_2 3-7%, VO 0.5-4%.

Для відновлення ванадію з оксидів можна використовувати кремній, водень, вуглець та алюміній [4,6]. В промислових процесах, з очевидних причин, зазвичай використовується алюміній [3,7]. При цьому певний вміст алюмінію у кінцевому продукті не заважає легуванню сталей. Завдяки можливості додавання додаткового тепла, електроалюмінотермічний процес дозволяє використовувати нижчі оксиди ванадію у шихті, реакції відновлення яких з алюмінієм менш екзотермічні, ніж для V_2O_5 [4]. Більше того, електрошлаковий процес дозволяє краще розділяти продукти плавлення та контролювати інтенсивність процесу. Всі інші варіанти відновлення є ендотермічними процесами, і деякі з відновлювачів є небажаними домішками [6].

Електрошлаковий процес має значний потенціал для використання різних техногенних відходів у шихті для зниження витрат. Наприклад, алюмінієві відходи легко доступні за відносно низькою вартістю, а збагачений глиноземний шлак, побічний продукт реакції, переробляється. Для регулювання вмісту ванадію у сплаві можна використовувати дрібні сталеві відходи після металообробки (стружка, дроб). За бажанням сталевий порошок можна замінити окалиною, відходів якої також багато утворюється у прокатних або волочильних виробництвах. У цьому випадку, звичайно, буде необхідно збільшити витрати відновлювача.

У цій роботі досліджено промисловий процес електроалюмінотермічного відновлення ванадію з технічного концентрату ванадію пентоксиду в умовах електрошлакового плавлення для отримання ферованадію з заданим вмістом ванадію.

Експериментальне плавлення проводилося на модифікованій установці електрошлакового плавлення типу ОВ-1901. Джерелом живлення плавильної установки є зварювальний трансформатор постійного струму на 1 кА та напругу 50 В. Установка має автоматичне регулювання напруги та чітке регулювання струму та напруги на самому джерелі живлення. Плавлення шихти відбувається у тиглі, футерованому вогнетривким матеріалом. Під час експериментів шихта для процесу електрошлакового відновлення складалася з концентрату ванадію пентоксиду, вторинного алюмінію, відходів сталевих порошків та флюсів для зниження вогнетривкості шлаку. До шихти додається оксид кальцію для зв'язування глинозему у менш вогнетривкий кальцій алюмінат [9]. Всі матеріали шихти з фракцією 0.3-1.0 мм змішувалися у змішувальному барабані

та відправлялися до плавильної установки. Суміш шихти завантажувалася у зазор між графітовим електродом та стінкою тигля. Терморекція ініціювалася дугою, а потім, у міру плавлення шихти, до тигля додавалася нова порція шихти. Після повного плавлення шихти шлакова ванна утримувалася під струмом близько 10 хвилин. Відновлення ванадію з алюмінієм відбувається у шлаковому шарі. Під час процесу плавлення краплі металу осідають на дно тигля під захисним шаром шлаку. Електрошлаковий процес забезпечує плавне відновлення та рідкий стан зростаючого шлакового шару як за рахунок енергії терморекції, так і за рахунок електричної енергії. Виходячи з досвіду попередніх досліджень [8] для забезпечення прийняттого рівня вилучення ванадію відновлювач додавався до шихти у кількості 101% до 103% від стехіометрично розрахованої кількості.

Перша серія експериментальних плавок (№ 1-4, Таблиця 1) проводилася з підключенням джерела живлення за схемою - "мінус" на основному електроді та "плюс" на нижньому електроді. Тигель був футерований Al_2O_3 , а нижній електрод був виготовлений з графіту. Склад шихти експериментального плавлення наведено у таблиці 1. Хімічний склад отриманого металу першої серії плавок показано у таблиці 2.

Як видно, сплав має підвищений вміст вуглецю через його взаємодію з матеріалом нижнього електрода. Крім того, експериментальна футерівка на основі глинозему показала низьку стабільність в умовах процесу. Тому було вирішено перепроектувати нижній електрод та замінити футерівку.

Таблиця 1. Склад шихти (%)

Плавка	V_2O_5	Al	Fe	CaO	CaF_2
1, 2	46.3	22.5	7.6	19.3	4.2
3, 4, 5, 6	46.27	19.2	7.4	24.4	2.5
7, 8, 9	48.65	20.3	7.8	20.3	2.9
10, 11, 12	46.75	22.1	7.5	20.7	2.85

Таблиця 2. Хімічний склад металу першої серії плавок (%)

Melt	V	Al	Si	Ti	Mn	Fe	C
1, 2	55	7.1	2.2	0.3	0.68	32.5	1.15
3, 4	65	1.4	1.0	0.2	0.50	29.3	1.40

Наступна серія плавок (№ 5-12, Таблиця 1) проводилася у модернізованому тиглі з футеровкою з вогнетривкої магнезитової цегли та сталевим нижнім електродом. Полярність джерела живлення також була змінена.

Хімічний склад металу, отриманого під час плавлення у модернізованому тиглі, наведено у таблиці 3. Зміна конструкції нижнього електрода забезпечила отримання сплаву з належним вмістом вуглецю. Результати останніх трьох плавок (№ 10-12, Таблиця 1) показали, що визначені параметри технології забезпечують стабільне виробництво сплаву з цільовим хімічним складом. Кожна з цих плавок дала в середньому 7.15 кг ферованадію, що становить 50.35% від загальної кількості оксиду ванадію та заліза у шихті, та 15.9 кг шлаку. Втрати з випаровуванням склали близько 0.55 кг. Вилучення ванадію у метал складало 85-90%. За результатами експериментального плавлення були визначені електричний режим та інші параметри технології, які забезпечили стабільне виробництво феросплавів марок FeV50 та FeV60 (№ 10-12, Таблиця 3).

Таблиця 3. Хімічний склад металу другої серії плавок (%)

Melt	V	Al	Si	Cr	Mn	Fe	C
5	59.99	2.98	0.75	0.68	1.11	33.24	0.59
6	63.09	2.16	0.78	0.55	2.54	29.71	0.42
7, 8, 9	56.60	2.30	1.5	3.40	2.90	32.10	0.30
10, 11, 12	68.70	1.80	1.0	0.20	0.09	27.80	0.30

Пілотні дослідження з виробництва ферованадію електроалюмінотермічним методом з хімічно збагачених відходів, що містять ванадій, з використанням електрошлакового процесу показали, що відновлення оксидів ванадію у шлаковому шарі з можливістю подачі додаткової енергії дозволяє ефективно контролювати інтенсивність процесу відновлення.

Електрошлаковий процес забезпечує ефективне розділення продуктів плавлення та має значний потенціал для використання різних промислових відходів у шихті для зниження витрат. Експерименти показали, що шляхом коригування складу шихти можна отримати феросплав з вмістом ванадію від 40 до 80%.

Під час тестових плавок була адаптована технологія для виробництва феросплаву з вмістом ванадію 50-60% на основі використання техногенних відходів для виробництва електродів. У пілотних плавках вихід ванадію у метал склав 85-90%. Цей показник можна покращити шляхом подальшого вдосконалення технології.

Процес електрошлакового відновлення забезпечує високу якість продукції та можливість безвідходного виробництва. Інвестиції в обладнання для цього процесу відносно низькі.

Список літератури

1. Simandl G. J. (2022) Vanadium as a critical material: economic geology with emphasis on market and the main deposit types. *Applied Earth Science*. 131 (4). 218–236. DOI: 10.1080/25726838.2022.2102883
2. Vanadium: Extraction, Manufacturing and Application. (2021) Elsevier. DOI: 10.1016/C2018-0-03399-X
3. Gasik M. (2013) Technology of vanadium ferroalloys. *Handbook of Ferroalloys*. Elsevier.
4. Swinbourne D. R., Richardson T. Cabalteja F. (2016) Understanding ferrovanadium smelting through computational thermodynamics modelling. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 125 (1). pp. 45-55. DOI: 10.1179/1743285515Y.0000000019.
5. Wenfang G., Zhi S., Hongbin C., He D., Yujiao Z., Pengge N., Gaojie X., Yi Z. (2020) Economic evaluation of typical metal production process: A case study of vanadium oxide production in China. *Journal of Cleaner Production*. 256. 120217. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120217
6. Gasik M., Dashevskii V., Bizhanov A. (2021) *Ferroalloys: Theory and Practice*. Springer.
7. Lyakishev N.P., Pliner Yu.L. (1978) *Aluminothermia*. Moscow: Metallurgy.
8. Kostetskyi Yu. at al. (2023) Features of the Process of Obtaining Ferrovanadium under Conditions of Electroslag Melting.
9. Hallstedl B. (1990) Assessment of the CaO-Al₂O₃ System. *Journal of the American Ceramic Society*. 73(1). pp. 15-23. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1990.tb05083.x

УДК 669.162.013

Г. Ю. Крячко, Є. М. Сігарьов, М. Р. Руденко, В. В. Філіп'єв

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ВЗАЄМОЗАЛЕЖНІСТЬ ДУТТЬОВИХ І ГАЗОВИХ ПАРАМЕТРІВ