

ОТРИМАННЯ ФЕРОВАНАДІЮ В УМОВАХ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОЇ ПЛАВКИ

Ю.В. Костецький, Є.О. Педченко, М.О. Вдовін, Г.О. Полішко, В.Л. Петренко, В.А. Зайцев

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: y.kostetsky@paton.kiev.ua

Розглянуто процес електроалюмінотермічного отримання ферованадію з ванадійвмісної шихтової суміші шляхом відновлення оксиду ванадію алюмінієм в шарі шлаку з одночасним електричним нагріванням шлакової ванни. Визначені ключові чинники, що впливають на базові показники процесу. Досліджено зразки кінцевого шлаку і визначено хімічний склад та розподіл металевих частинок у шарі шлаку. Бібліогр. 15, табл. 4, рис. 7.

Ключові слова: електрошлаковий процес, ферованадій, електроалюмінотермічне відновлення, шлак, хімічний склад, метал, включення

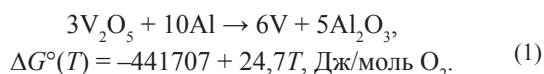
Вступ. Понад 90 % усього видобутого у світі ванадію використовується в металургійній промисловості для виробництва спеціальних сталей та легування титанових сплавів [1–4]. Додавання ванадію до хімічного складу сталі сприяє підвищенню зносостійкості, міцності та твердості металу [2, 5]. Ванадій зв'язує азот та зменшує чутливість сталі до старіння, одночасно підвищує її жаростійкість. Мікролегування ванадієм знайшло широке застосування в конструкційних сталях, значно покращуючи їх споживчі властивості [6, 7]. Ванадій також використовують для легування чавунів [8]. Титанові сплави, що містять до 4 % ванадію, широко використовують у аерокосмічній промисловості для виготовлення деталей реактивних двигунів та планерів літальних апаратів [3].

Світові тенденції в металургії і суміжних галузях свідчать про стале зростання попиту на ванадійвмісні сталі та сплави [4]. Під час виплавки сталей ванадій вводять в метал переважно у формі ферованадію [2, 9]. Інші ванадійвмісні сплави, так звані лігатури, використовують рідше. На ринку присутні марки ферованадію із вмістом ванадію від 35 до 85 % [9, 10]. Однак більшість ферованадію виробляють і споживають у вигляді феросплаву FeV80. З одного боку, у процесі його виробництва, більший вміст ванадію в сплаві зменшує питомі виробничі витрати на одиницю продукції, що робить виробництво більш рентабельним. З іншого, металургійні підприємства, як споживачі, також віддають перевагу FeV80, щоб мінімізувати загальну кількість феросплаву, яку необхідно витрачати під час легування сталі.

Основною сировиною для виробництва ферованадію є оксиди ванадію [9–11]. Відновлення ванадію з його оксидів може здійснюватися

вуглецем, кремнієм та алюмінієм. Використання вуглецю, як відновника, призводить до отримання сплаву з підвищеним вмістом вуглецю. Тому в промисловості для відновлення ванадію з його оксидів використовують кремній і алюміній. Однак силікотермічним способом неможливі отримувати ферованадій з великим вмістом ванадію і малим вмістом вуглецю [9, 10]. Між тим алюміній відновлює ванадій повніше ніж кремній завдяки більшій термодинамічній міцності оксиду алюмінію. Тому низьковуглецеві феросплави з вмістом ванадію більше 70 % отримують лише алюмінотермічним відновленням. Сплави з меншим вмістом ванадію часто виробляють силікотермічним способом [9, 10].

Реакція відновлення ванадію алюмінієм з пентаоксида є дуже екзотермічною:



Тепла, що виділяється під час цієї реакції, достатньо не лише для розплавлення заліза, що додається для отримання сплаву, але й для забезпечення ефективного розділення отриманого металу і шлаку, збагаченого оксидом алюмінію [12].

Усі промислові процеси з відновленням оксидів ванадію алюмінієм можна поділити на алюмінотермічні (термітні) та електроалюмінотермічні [7, 10].

У позапічному алюмінотермічному процесі (термітному) шихта складається з залізного брухту (або оксиду заліза), гранул п'ятиокису ванадію, алюмінію і флюсів, таких як кальциноване вапно та плавиловий шпат [9, 12]. Алюміній додають у шихту в кількості 100...102 % від потрібної для відновлення п'ятиокису ванадію за стехіометрією.

Ю.В. Костецький — <http://orcid.org/0000-0003-0742-0684>, Є.О. Педченко — <http://orcid.org/0000-0002-8824-4389>,
М.О. Вдовін — <https://orcid.org/0009-0007-4848-4154>, Г.О. Полішко — <http://orcid.org/0000-0001-7543-280X>,
В.Л. Петренко — <http://orcid.org/0000-0003-2440-1901>, В.А. Зайцев — <http://orcid.org/0000-0003-2498-8191>

Перед завантаженням у реактор шихтові матеріали ретельно перемішують у змішувальному барабані. Процес відновлення здійснюють у футерованих магnezитом реакторах. Отриманий таким способом ферованадій зазвичай містить 82...85 % V, до 2 % Si, 1,5 % Mn і 0,06 % C. За промислових умов у сплав переходить 90...95 % ванадію шихти. Кінцевий шлак містить до 4,5 % оксидів ванадію. Основними недоліками цього процесу є велика інтенсивність реакції, що супроводжується значними пилогазовими викидами, та значні втрати металу із залишками в шлаку після реакції.

Для збільшення вилучення ванадію в сплав застосовують схему плавки з додатковим електропідігрівом шлаку під час виробництва ферованадію [6, 9, 10]. Додатковий підігрів шлаку сприяє більш повному відновленню ванадію і покращує умови для розділення продуктів плавки, оскільки шлак залишається достатньо рідким на протязі усієї плавки. Електрошлаковий процес є менш активним і відповідно більш керованим ніж термітний, а вилучення ванадію за певних умов зростає до 95...97 %. Електроалюмінотермічний спосіб також дозволяє використовувати для виробництва ферованадію нижчі оксиди ванадію (V_2O_3 , V_2O_4), реакції відновлення яких супроводжуються меншим тепловим ефектом [10].

У цій роботі експериментально досліджено електроалюмінотермічний процес отримання ферованадію з ванадійовмісної сировини шляхом відновлення оксиду ванадію алюмінієм в шарі шлаку з одночасним електричним нагріванням шлакової ванни.

Експерименти проводили на лабораторній електрошлаковій печі типу УШ-114 і напівпромисловій флюсоплавильній печі типу А-550. Джерелом ванадію в шихті виступав гранульований технічний п'ятиокис ванадію фракцією 3...5 мм з хімічним складом, мас. %: 82...86 V_2O_5 , 3...8

Al_2O_3 , 4...7 CaO, до 2 Fe_2O_3 , 1,5 TiO_2 , 0,3 SiO_2 , 0,5 інші домішки. Як відновник використовували по-дрібнені алюмінієві відходи з розміром частинок 3...5 мм. До складу шихти також входив залізний порошок фракцією 1 мм. Для регулювання хімічного складу шлакової ванни використовували вапно і фтористий кальцій. Відправною точкою для визначення складу шихти слугував стехіометричний розрахунок згідно реакції (1). Для отримання феросплаву із заданим вмістом ванадію (C_v , %) до складу шихти необхідно ввести залізо у кількості, яку можна розрахувати за формулою:

$$m_{Fe} = \frac{100 - C_v}{C_v} m_v = \frac{100 - C_v}{C_v} 0,56 m_{V_2O_5}, \text{ кг.}$$

Отже, для отримання з 10 кг пентаоксиду ванадію феросплаву із вмістом ванадію 50 % в шихту необхідно додати 4,9 кг алюмінію і 5,6 кг заліза, а для отримання феросплаву з 80 % ванадію — 1,4 кг заліза. При цьому загальна розрахункова кількість отриманого сплаву складе 11,2 і 7,0 кг відповідно. Загальна кількість шлаку, що утвориться з Al_2O_3 і CaO, становитиме 12,3...13,3 кг. Оскільки в шихті використовується технічний оксид ванадію, який містить домішки, до шлаку разом з ним надійде 0,36...0,95 кг оксиду алюмінію і 0,48...0,83 кг оксиду кальцію. Окрім цього з пентаоксидом ванадію в шлак надійде до 0,24 кг Fe_2O_3 та 0,18 кг TiO_2 , які можуть бути відновлені алюмінієм до відповідних металів і перейти у феросплав. Наприклад, за умови повного відновлення оксиду титану, ферованадій з 80 % ванадію може отримати у хімічному складі до 1,5 % титану. З огляду на можливі витрати алюмінію на відновлення оксидів заліза і титану кількість алюмінію в шихті слід збільшити на 1...2 % від необхідної для відновлення усього оксиду ванадію шихти.

Для формування шлаку бажаного складу в шихту додають вапно і фторид кальцію. Щоб мати рідкий шлак, відповідно до діаграми рівноваги в системі $CaO-Al_2O_3$ [13], вміст вапна у ньому повинен становити 48...53 % від вмісту Al_2O_3 . Рациональну кількість фтористого кальцію в шихті визначали експериментально, оскільки він є не лише розріджувачем шлаку, але і регулятором його електричного опору. Під час лабораторних експериментів на печі УШ-114 шлакову суміш формували на основі флюсу типу АНФ-28 [14], який містить 41...49 % CaF_2 , 26...32 % CaO, 20...21 % SiO_2 та до 5 % Al_2O_3 . Відновлювальний процес здійснювали в графітовому тиглі. Загальна схема організації плавки показана на рис. 1.

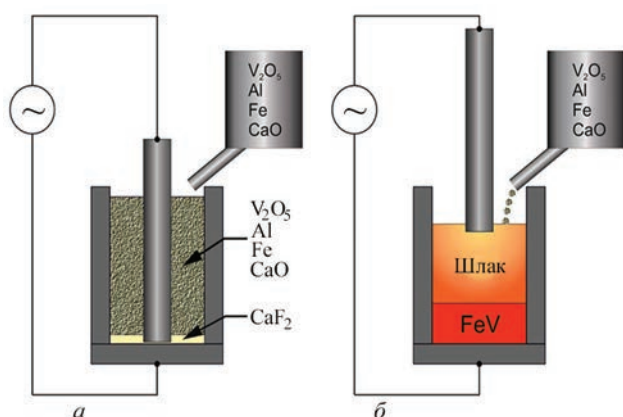


Рис. 1. Схема реалізації процесу відновної електрошлакової плавки ферованадію: а — ініціювання процесу; б — плавлення шихти

Таблиця 1. Склад шихти лабораторних плавок, г

Експеримент	V ₂ O ₅	CaF ₂	АНФ-28	Fe	Al	Разом
10	400	20	100	50	200	770
11	200	—»—	—»—	—»—	100	470
12	500	—»—	—»—	—»—	170	840
13	—»—	70	—»—	—»—	140	860
14	510	150	—	—»—	—»—	850

Таблиця 2. Хімічний склад отриманого металу, мас. %

Експеримент	V	Al	Si	Ti	Fe
10	41,38	14,7	2,51	1,63	38,48
11	24,45	7,21	1,43	нема даних	62,35
12	65,15	4,17	2,66	0,64	25,45
13	61,29	7,38	4,0	0,44	23,03
14	67,0	11,0	нема даних	нема даних	15,0

Плавку починали твердим стартом з розплавленням частини шлакоутворювальних матеріалів у тиглі. Після утворення рідкої шлакової ванни порціями завантажували шихтову суміш у простір між графітовим електродом і стінкою тигля. Для регулювання хімічного складу шлаку періодично додавали шлакоутворювальні компоненти. Швидкість завантаження шихти регулювали відповідно до швидкості її плавлення. Після розплавлення усієї шихти шлакову ванну певний час витримували з підведеним живленням для завершення відновних реакцій і досягнення більш повного розділення металу і шлаку. По завершенню витримки джерело живлення відключали, а розплавлені продукти плавки виливали з тигля в підготовлену металеву форму. Після їх застигання і охолодження на лабораторних вагах вимірювали масу отриманого металу та шлаку й відбирали проби для хімічного аналізу. Регулювання електричного режиму під час плавки здійснювали вручну.

У лабораторних умовах на електрошлаковій печі типу УШ-114 було здійснено серію плавок, під час яких експериментально вивчали особливості перебігу відновного електрошлакового процесу, стан шлакової ванни та визначали умови для досягнення найкращих результатів. У табл. 1, 2 подано склад шихти і хімічний склад отриманого металу для п'яти завершальних лабораторних плавок.

Експериментальні плавки в невеликому об'ємі дозволили відрегулювати склад шихти для отримання шлакової ванни з потрібною густиною і електричним опором, щоб забезпечити належний перебіг процесу відновлення та розділення шлаку й металу. Однак за малого об'єму розплаву і малої тривалості плавки, що не перевищувала 5 хв, плавильний тигель не встигав достатньо нагрітись,

щоб увесь отриманий метал перебував в рідкому стані до завершення процесу у всьому об'ємі плавильної зони. Як наслідок, певну частину металу не вдавалося вилити з тигля по завершенні плавки. Значні питомі втрати тепла з плавильного простору, як прояв масштабного фактору, також негативно впливали на повноту процесу відновлення, що ілюструє підвищений вміст алюмінію в отриманому металі (табл. 2) навіть за умови його фактичної нестачі в шихті відносно до розрахункового за стехіометрією. Збільшення температури шлакової ванни сприяло збільшенню вилучення ванадію в метал (плавки 12–14, табл. 2).

На підставі аналізу даних лабораторних плавок було розроблено шихтову суміш для виплавки ферованадію за електрошлаковою технологією без використання флюсу АНФ-28. Для експериментальної плавки в більшому масштабі, яку здійснювали на печі типу А-550, було обрано склад шихти, показаний у табл. 3.

Співвідношення шлакоутворювальних компонентів в шихті підібрали так, щоб на початку плавки отримати рідку шлакову ванну, що складається з CaF₂ і CaO, а в подальшому, у міру надходження в шлак оксиду алюмінію внаслідок протікання реакції (1), відсотковий вміст CaO в шлаку підтримувати на рівні 48...53 %.

Під час плавки шихта розплавлялась досить швидко, але без вираженого піроефекту. Загальна кількість шихти на плавку становила 23,6 кг. Тривалість процесу проплавлення шихти склала

Таблиця 3. Склад шихти для експеримента з електрошлакової виплавки ферованадію, %

V ₂ O ₅	Al	Fe	CaF ₂	CaO	Разом
55	22	5	2	16	100



Рис. 2. Зовнішній вигляд шлаку та феросплаву у виливниці
близько 16 хв і ще протягом 4 хв шлакову ванну витримували під струмом. По завершенні процесу продукти плавки злили у сталеву виливницю (рис. 2). При цьому в плавильному тиглі не залишилося жодних залишків металу чи шлаку. Загальна маса продуктів плавки склала 23,05 кг, з них 7,15 кг ферованадію та 15,9 кг шлаку (2,22 кг шлаку на кілограм металу). Втрати з випаровуванням склали 0,55 кг. Кількість отриманого ферованадію становить 84,3 % від сумарної розрахункової кількості ванадію і заліза шихти. При цьому питома витрата електроенергії становить 1,958 кВт·год/кг або 14 кВт·год на один експеримент.

Хімічний склад отриманого сплаву наведено в табл. 4. Зависокий вміст вуглецю в металі обумовлений проведенням відновного процесу в графітовому тиглі. Проте використання тигля з футерівкою з вогнетривкого матеріалу, який не містить вуглецю, забезпечить отримання у виробництві сплаву з вмістом вуглецю, яке відповідає вимогам. Вилучення ванадію шихти в метал склало 72 %. При цьому відновлення здійснювали з фактичною нестачею алюмінію в шихті відносно теоретично необхідного з метою визначення ступеня його використання і засвоєння металом. Аналіз отриманих даних показав, що безпосередньо на відновлення ванадію, який перейшов у ферованадій, витрачено 89 % алюмінію шихти, а до сплаву перейшло 3,9 % алюмінію шихти. Решта алюмінію витрачена на відновлення оксидів заліза, титана та втрачена з випаровуванням й окисненням. Вочевидь процес взаємодії металевго алюмінію зі шлаковою ванною потребує додаткового вивчення. Проте, у будь-якому випадку, для збільшення вилучення ванадію у сплав слід збільшити частку алюмінію в шихті з урахуванням відповідних стехіометричних співвідношень.

Таблиця 4. Хімічний склад отриманого ферованадію, мас. %

V	Si	Al	C	Mn	Ti
72,68...74,27	0,6...1,17	1,67...2,93	2,08	0,08...0,11	0,3



Рис. 3. Загальний вигляд шару шлаку у розрізі (знизу межа шлак–метал)

Було досліджено шлак експериментальної плавки, який надійшов у виливницю разом з металом. Товщина шару шлаку у виливниці становила приблизно 0,05 м (рис. 2). Шлак мав сірий колір і щільну волокнисту структуру (рис. 3). На поверхні шлаку, що відповідає межі шлак–метал, спостерігався тонкий жовтувато-білий шар. Дослідження показали, що він зовсім не містить оксиду ванадію. Між тим, у самому шлаку міститься до 4 % оксиду ванадію, 52...59 % оксиду алюмінію та 32...36 % оксиду кальцію. Ці дані показують, що для покращення результату слід не лише збільшити частку алюмінію в шихті, але й додавати вапно у шлакову ванну перед витримкою в такій кількості, щоб співвідношення вапно/оксид алюмінію в шлаку становило близько 1:1.

Дослідження зразків шлаку під електронним мікроскопом виявило наявність скупчення дрібних металевих включень уздовж поверхні шлак–метал у шарі товщиною приблизно 8 мм (рис. 4). Середній розмір виявлених частинок металу 120...125 нм (рис. 5). За хімічним складом вони являють собою ванадій (97...98 %) з домішкою алюмінію (рис. 5, 6). Аналіз хімічного складу шлаку в цьому шарі показав, що він складається переважно з оксиду алюмінію, оксиду кальцію та невеликої кількості оксиду ванадію (рис. 6).

Середній розмір частинок металу, виявлених у шарі шлаку, поступово зменшується зі 125 нм близько межі метал–шлак до 70 нм (рис. 7, а) у середині шару та до 10 нм близько межі шлак–атмосфера (рис. 7, б). При цьому вміст алюмінію в їх хімічному складі збільшується (рис. 6, 7). Вміст залишкового ванадію в шарі шлаку у напрямку

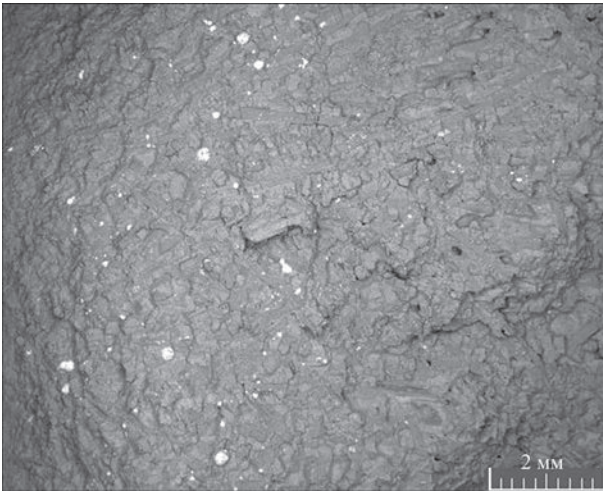


Рис. 4. Скупчення частинок металу в шарі шлаку біля межі шлак–метал (поверхня праворуч)

від межі шлак–метал (нижні шари) до поверхні шлак–атмосфера (верхні шари) подвоюється з 1,08 до 2,15 % поблизу поверхні. У середніх шарах залишковий вміст ванадію становить 1,79 %. Така картина є наслідком продовження перебігу

відновного процесу у шарі шлаку після його потрапляння у виливницю з одночасним осіданням краплинок металу в рідкому шлаці під дією сили тяжіння. Реакція (1) є сильно екзотермічною, тож зі зниженням температури рівновага в ній зміщується далі у бік відновлення ванадію. Зважаючи на це під час виробництва може бути доцільним вживати заходи, спрямовані на уповільнення охолодження шлаку у виливниці.

Слід зазначити, що у досліджених зразках шлаку не виявлені крупні за розміром включення металу, що є показником досить гарного розділення продуктів плавки. Усі виявлені в шарі шлаку частинки металу складаються з ванадію та алюмінію і не містять заліза. Можна припустити, що під час розплавлення заліза шихти (в експерименті це порошок фракцією 1 мм) крупні краплі розплавленого заліза, що утворюються, не подрібнюються у шлаковій ванні і досить швидко відокремлюються від неї, переходячи у ванну рідкого металу. У той час відновлення ванадію переважно відбувається саме на краплях алюмінію. Вони мають мен-

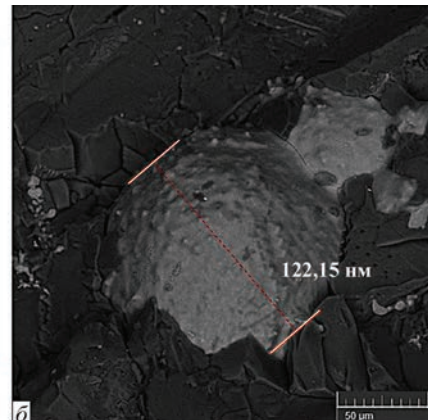
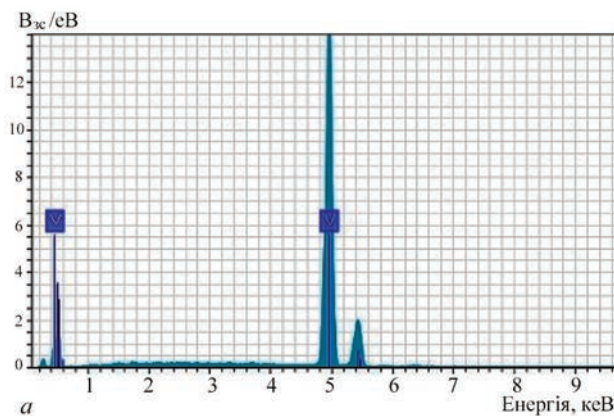


Рис. 5. Розмір (а) і хімічний склад (б) металевго включення в шлаку поблизу межі розділу шлак–метал

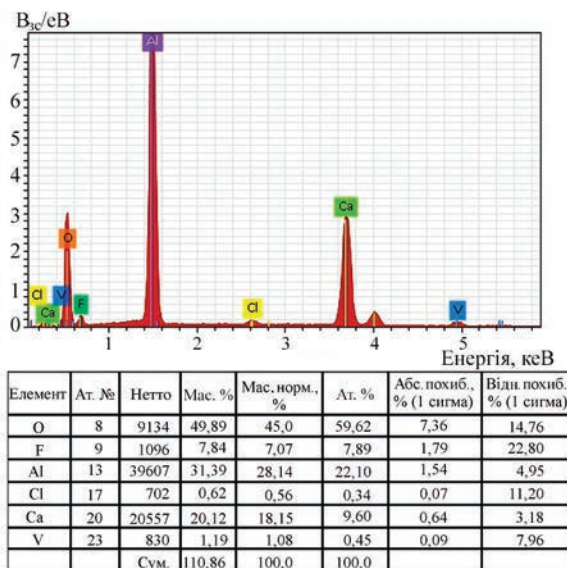
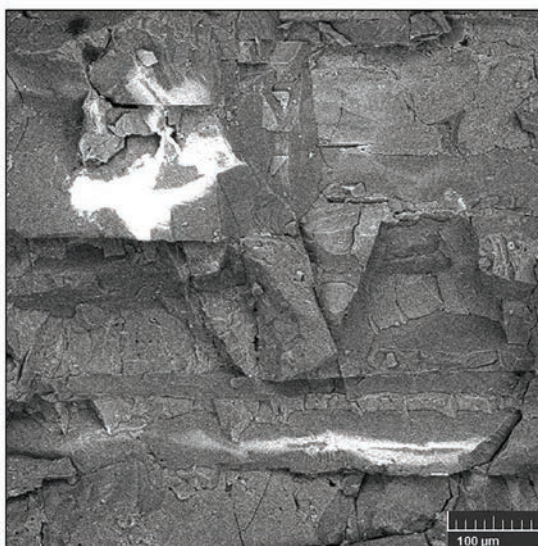


Рис. 6. Склад шлаку в шарі, насиченому металевими включеннями, поблизу межі розподілу шлак–метал

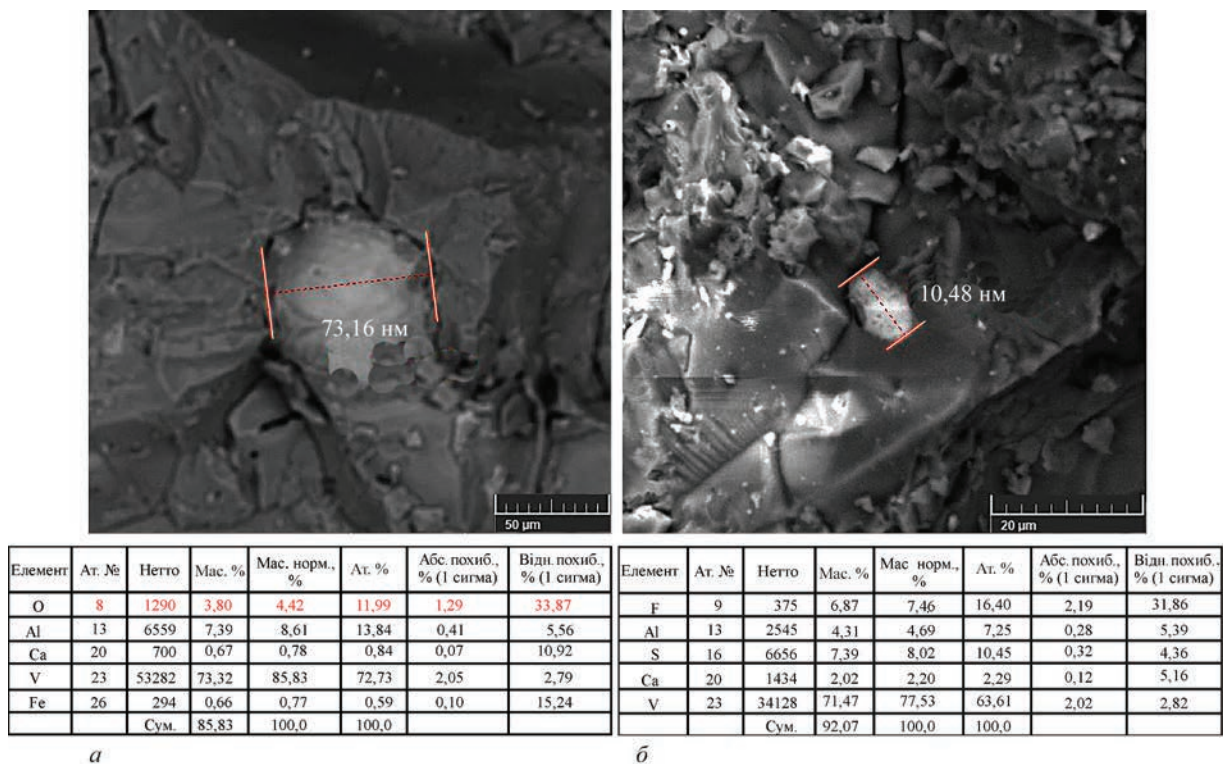


Рис. 7. Розмір та хімічний склад частинок металу в середині шару шлаку (а) та біля кордону шлак–атмосфера (б)

шу питому масу, ніж залізни і, відповідно, меншу швидкість осідання, та можуть бути захопленими потоками рідкого шлаку. Окрім того, протікання сильно екзотермічної реакції відновлення ванадію суттєво розігріває зону реакції, що призводить до зменшення величини поверхневого натягу присутніх речовин, розрідженню рідких фаз і тим самим сприяє диспергуванню металевої фази у шлаку внаслідок деформації крапель під дією динамічних напорів середовища, які перевищують сили міжфазного натягу [15]. Таким чином, рух, коалесценція та диспергування крапель металу різного складу в шарі шлаку відіграють значну роль у розділенні продуктів плавки і формуванні сплаву.

Висновки

1. Процес отримання ферованадію електроалюмінотермічним способом, під час якого ванадій відновлюється з свого оксиду алюмінієм у шарі шлаку в електрошлаковій печі, є менш активним і тому більш керованим ніж алюмінотермічний (термітний). За такої організації відновного процесу легше контролювати в'язкість шлаку, розділення продуктів плавки, розчинення вогнетривкої футеровки та досягати високої якості продукту. Завдяки можливості гнучко регулювати склад шихти можливо виробляти феросплави з вмістом ванадію від 40 до 80 % залежно від потреб. Ще однією важливою перевагою електроалюмінотермічного процесу є спрощені вимоги до підготовки сировини.
2. Під час експерименту з випробування розробленої методики отримання ферованадію, здійс-

неного на електрошлаковій плавильній печі типу А-550, в умовах, наближених до промислових, з шихти масою 23,6 кг було отримано 7,15 кг ферованадію з вмістом ванадію 73...74 % і 15,9 кг шлаку із залишковим вмістом оксиду ванадію до 4 %. При цьому вилучення ванадію в металеву фазу склало 72 %, а витрата електроенергії — 1,958 кВт·год/кг.

3. Металеві включення, виявлені в кінцевому шлаку, мають розмір 10...125 нм і за хімічним складом являють собою ванадій з невеликою домішкою алюмінію. Їх розподіл за розмірами і хімічним складом у шарі шлаку показує, що відновлення ванадію та сегрегація продуктів плавки продовжується й у виливниці під час остигання шлаку.

4. Роботи з подальшого удосконалення випробуваної технології та її адаптації до умов конкретного виробництва потребують вирішення завдань зі збільшення ступеня вилучення ванадію у сплав та оптимізації питомих енерговитрат.

Список літератури/References

1. Moskalyk, R.R., Alfantazi, A.M. (2003) Processing of vanadium: A review. *Minerals Engineering*, 16(9), 793–805. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(03\)00213-9](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00213-9)
2. Yang, B., He, J., Zhang, G. et al. (2021) Chapter 11 — Applications of vanadium in the steel industry. *Vanadium*. Elsevier, 267–332. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818898-9.00011-5>
3. Simandl, G.J. (2022) Vanadium as a critical material: Economic geology with emphasis on market and the main deposit types. *Applied Earth Sci.*, 131(4), 218–236. DOI: <https://doi.org/10.1080/25726838.2022.2102883>
4. Swinbourne, D.R., Richardson, T., Cabalteja, F. (2016) Understanding ferrovanadium smelting through computational

- thermodynamics modelling. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 125(1), 45–55. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743285515Y.0000000019>
5. Liu, Z., He, B., Lyu, T., Zou, Y. (2021) A review on additive manufacturing of titanium alloys for aerospace applications: Directed energy deposition and beyond Ti–6Al–4V. *JOM*, 73(6), 1804–1818. DOI: <https://doi.org/10.1007/S11837-021-04670-6>
 6. Villalobos, J.C., Del-Pozo, A., Campillo, B. et al. (2018) Microalloyed steels through history until 2018: Review of chemical composition, processing and hydrogen service. *Metals*, 8(5), 351. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8050351>
 7. Baker, T.N. (2016) Microalloyed steels. *Ironmaking & Steelmaking*, 43(4), 264–307. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743281215Y.00000000063>
 8. Kim, S., Baek, E., Jang, B. (2021) The effect of vanadium addition on the fracture and wear resistance of indefinite chilled cast iron. *Materials Today Communications*, 26(3), 101819. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101819>
 9. Gasik, M. (2013) Technology of vanadium ferroalloys. *Handbook of Ferroalloys*. Elsevier, 397–409. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-04204-7>
 10. Yang, B., He, J., Zhang, G., Guo, J.B. (2021) Chapter 10 — Ferrovandium. *Vanadium*. Elsevier, 243–266. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818898-9.00010-3>
 11. Gasik, M., Dashevskii, V., Bizhanov, A. (2021) *Ferroalloys: Theory and practice*. Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-57502-1>
 12. Lyakishev N.P., Pliner Yu.L. (1978) *Aluminothermy*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
 13. Hallstedt, B. (1990) Assessment of the CaO–Al₂O₃ system. *J. of the American Ceramic Society*, 73(1), 15–23. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb05083.x>
 14. GOST 30756–2001: *Fluxes for electroslag technologies. General specifications*. Minsk, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification.
 15. Nekrasov, O.P., Veretenchenko, B.A. (2018) *Surface phenomena and disperse systems*. Kharkiv, NTU KhPI.

PRODUCTION OF FERROVANADIUM UNDER THE CONDITIONS OF ELECTROSLAG MELTING

Yu.V. Kostetsky, E.O. Pedchenko, M.O. Vdovin, G.O. Polishko, V.L. Petrenko, V.A. Zaytsev
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: y.kostetsky@paton.kiev.ua

The electroaluminothermic process is considered for ferrovanadium production from a vanadium-containing charge mixture by reducing vanadium oxide with aluminum in a slag layer with simultaneous electrical heating of the slag bath. The key factors influencing the fundamental parameters of the process have been identified. Samples of final slag were examined, and chemical composition and metal particle distribution in the slag layer were determined. 15 Ref., 4 Tabl., 7 Fig.

Keywords: electroslag process, ferrovanadium, electroaluminothermic reduction, slag, chemical composition, metal, inclusions

Отримано 04.09.2024

Отримано у переглянutoму вигляді 28.10.2024

Прийнято 16.12.2024



INTERNATIONAL TRADE FAIR

JOINING ▲ CUTTING ▲ SURFACING

JOIN THE FUTURE

15. – 19.09.2025

www.schweissen-schneiden.com | [#schweissenundschneiden](https://twitter.com/schweissenundschneiden) |

MESSE
ESSEN