

УДК 661.882.22-14.061

*С.В. Писаренко ^а, В.Ю. Черненко ^а, О.Е. Чигиринець ^а, О.М. Камінський ^б, М.О. Мироняк ^в***ЛУЖНЕ ВИЛУГОВУВАННЯ ТИТАНУ З ІЛЬМЕНІТУ ІРШАНСЬКОГО РОДОВИЩА**^а Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна^б Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир, Україна^в ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна

Рентгеноспектральні дослідження хімічного складу концентрату Іршанського ільменіту показали, що він є лейкоксенізованим з високим (до 79%) вмістом оксиду титану та включеннями псевдуриту. Досліджено процес лужного вилуговування Ti^{4+} з ільменіту. Вивчення впливу температури на перебіг реакції взаємодії ільменіту з калій гідроксидом за атмосферного тиску показало, що для одержання калій титанату достатньою є температура 453 К. Подальше підвищення температури не забезпечує суттєве підвищення виходу водорозчинного титану. Встановлено, що оптимальним та достатнім співвідношенням для протікання реакції між ільменітом і калій гідроксидом є 1:2. Збільшення кількості калій гідроксиду в реакційній суміші є недоцільним, оскільки при цьому зменшується вихід розчинного титану, а кінцевий продукт матиме високу лужність за рахунок наявності луку, що не вступив в реакцію. Основний процес вилуговування з утворенням твердого плаву завершується за перші 30 хвилин перебігу процесу. ІЧ-спектроскопією та рентгенографічним методом доказано, що в досліджених умовах лужного вилуговування ільменіту утворюється калій титанат (K_2TiO_3).

Ключові слова: ільменіт, лужне вилуговування, калій титанат, мольне співвідношення, вихід продукту.

DOI: 10.32434/0321-4095-2021-139-6-51-56

Вступ

Значні запаси та ресурси титану зосереджені у 48 країнах світу, і за даними United States Geological Survey (2019 р.) становлять 800 мільярдів тон, найбільший відсоток яких знаходиться в Китаї та Австралії [1].

Склад ільменітової руди в першу чергу залежить від географічного розміщення родовища, а отже різниться за хімічним і мінералогічним складом. Саме ці чинники безпосередньо впливають і на методи перероблення руди. Так, ільменітова руда Panzhihua (Китай) містить велику кількість CaO та MgO і перебуває у формі ванадій-титанового магнетиту, що ускладнює його перероблення [2]. Запаси ільменіту Австралії досить легко експлуатувати, оскільки він наданий розсипними родовищами на заході країни. Проте розробка цих родовищ дещо стримується, оскільки сприяє обмеженню використання землі для інших цілей, а саме сільського

господарства, створення національних парків і підтримки туризму [3]. Розсипні родовища також надані в Індії, Бразилії, Шрі-Ланці. Україна є однією з тих країн, в яких видобуток титану ведеться з розсипних покладів.

Запаси титану на Житомирщині складають понад 85% усіх розвіданих запасів титанових руд України. Вагому частку у видобуванні ільменітової руди в Україні (40%) займає Іршанське родовище. Ільменітовий концентрат, одержаний за допомогою магнітної сепарації руди, відрізняється не лише за своїм мінералогічним складом, але і за хімічними властивостями. За даними [4] ільменіт Іршанського родовища має включення аутигенних мінералів, зокрема, сидериту, піриту, марказиту. Особливістю ільменіту цього родовища є те, що він є лейкоксенізованим (сильно зміненим, а саме збагаченим титаном), а його часточки містять мікротріщини, які характерні для руд, що природно збагачені

за рахунок тривалого вивітрювання.

Існує декілька способів хімічного перероблення титанової руди з метою одержання більш реакційноздатних сполук. Найбільш поширеними є хлоридний і сульфатний методи обробки ільменітового концентрату. Як стверджують автори [5], при використанні кислотного методу повне вилучення титану з ільменіту досягається лише у випадку дії надлишкової кількості кислоти та довготривалого нагрівання (протягом кількох годин), що є недоліком даного методу.

Для перероблення ільменітів хлоридним методом, фазовий склад не має значення, оскільки за цією технологією необхідна плавка на шлак. Також хлоридна технологія перероблення ільменітового концентрату має коротшу технологічну схему, що зменшує економічні витрати на виробництво.

Однією з переваг сульфатного методу перероблення титановмісної сировини над хлоридним є можливість використання руди з меншим вмістом ільменіту. Однак для ефективної хімічної переробки ільменітового концентрату сульфатним способом потрібний незмінений ільменіт. Оскільки ільменіт Іршанського родовища належить до змінених, то технологія кислотного перероблення не є ефективною для цієї руди, і постає необхідність в пошуку інших методів перероблення. Наприклад, автори [6,7] пропонують активувати такі ільменітові руди фторидними добавками.

Альтернативою використанню фторидних активаторів є процес лужного вилучення титану, який останнім часом все більше стає предметом досліджень. Для переробки титанових руд таким методом найчастіше використовують калій або натрій гідроксиди. Хоч лужний метод вилучення ще не має широкого промислового впровадження, але йому належить низка переваг над іншими методами, серед яких висока швидкість процесу переведення титану в розчинну форму титанатів і рівень ефективності використання сировини [8–12].

Для перероблення ільменіту лужним методом у світі користуються різними підходами. Більша частина методик передбачає проведення реакції у водному розчині лугів. Так, для вивчення процесу лужного вилучення титану авторами [9] використано ільменітовий концентрат (%): TiO_2 44,7; FeO 15,8; Fe_2O_3 29,3 та домішки SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , CaO , MnO , Cr_2O_3) виробництва *Kahnooj Titanium Complex*, Керман (Іран). Реакцію вивчали в 85%-вому розчині калій гідроксиду при температурі 493 К за атмосфер-

ного тиску та наявності кисню повітря.

Дослідження лужного вилучення титану з ільменіту родовища на острові *Bangka* (Індонезія) здійснено в роботі [10]. Хімічний склад даного ільменіту наданий такими сполуками (%): TiO_2 38,3; Fe_2O_3 49,44 та домішками SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , CaO , MnO , тощо. Взаємодія ільменіту з концентрованим розчином лугу (KOH) вивчалася в автоклаві за підвищених тисків і температури 473 К.

При дослідженнях зразків ільменіту (%): TiO_2 46,38; FeO 25,13; Fe_2O_3 20,0; домішки SiO_2 , Al_2O_3 , P_2O_5 , MgO , CaO , V_2O_5 , Cr_2O_3 , MnO , відокремлених від чорних пісків узбережжя *Rosetta* (Єгипет) [11], було використано розчини калій та натрій гідроксидів (70%). Вилуговування виконували в два етапи. Спочатку суміш розчинів лугів та ільменіту витримували при температурі 393 К, а потім одержану ільменітову пасту піддавали кислотному вилуговуванню.

Існують і інші підходи, а саме протікання реакції при сплавленні лугів та ільменіту. Так, авторами [8] з використанням ільменіту узбережжя *Rosetta* (Єгипет) проведені дослідження при сплавленні ільменіту з KOH та NaOH при різних мольних співвідношеннях компонентів в діапазоні температур 623–723 К.

Хоча лужний метод вилуговування ще не має широкого промислового поширення, але йому належить ряд переваг над іншими методами, серед яких висока швидкість процесу переведення титану в розчинну форму титанатів і відносно низькі температурні межі протікання реакції.

Попри всі переваги зазначених методик, одним із вагомих недоліків даних досліджень є досить високий відсоток лугів у реакційних сумішах, а відповідно і одержаних сплавів, що в подальшому потребує нейтралізації значною кількістю кислоти, внаслідок чого збільшується собівартість утвореного продукту. Крім того, кожен із запропонованих методів відображує власну схему переробки ільменіту певного родовища. Не вирішеним питанням залишається встановлення оптимальних співвідношень луг–ільменіт у реакційних сумішах і температурних режимів протікання реакцій.

Таким чином, аналіз літератури свідчить про те, що ільменіти різних родовищ суттєво відрізняються за вмістом оксидів титану, заліза та інших складових. Тому постає необхідність в пошуку економічно доцільної методики лужного вилучення розчинної форми титанату калію з ільменітової руди Іршанського родовища, що і

є метою даної роботи.

Методика експерименту

Як об'єкт дослідження використовували ільменітовий концентрат Іршанського ГЗК. Як луг використовували КОН, оскільки він на відміну від NaOH є більш ефективним для вилуговування, про що свідчать дослідження авторів [12]. Для порівняння вивчали перебіг реакцій лужного вилуговування з використанням зразку TiO_2 зі структурою рутилу.

Зразки ільменітової руди було досліджено методом скануючої електронної мікроскопії з рентгеноспектральним елементним мікроаналізом на електронному мікроскопі «JSM-6490 LV» з енергодисперсійним (EDS) та хвиледисперсійним (WDS) спектрометрами «Energy Plus» («Oxford Instruments»).

ІЧ-спектроскопічні дослідження ільменіту, титан(IV) оксиду та одержаних плавів « $FeTiO_3:KOH$ » та « $TiO_2:KOH$ » здійснювали на спектрофотометрі з перетворенням Фур'є «AGILENT CARY 630» в спектральному діапазоні $400-4000\text{ см}^{-1}$.

Дифракційні картини зразку ільменіту реєстрували за допомогою рентгенівського дифрактометра ДРОН-3М (випромінювання міді, лінія $K\alpha$, $\lambda=0,1540\text{ нм}$).

Методика одержання плавів

Ільменіт попередньо подрібнювали в агатовій ступці та просіювали з використанням набору сит для отримання фракції з розмірами мінеральних часток $d\leq 71\text{ мкм}$. Реакційні суміші готували шляхом змішування подрібнених ільменіту та гідроксиду калію за різних мольних співвідношень: 1:2; 1:3; 1:4; 1:5 та 1:6.

Гомогенізовану реакційну суміш швидко поміщали в реактор (об'ємом 90 см^3) і нагрівали на гліцериновій бані за температури 453 К при постійному перемішуванні протягом 30 хв до повного її затвердіння. Подальші дослідження плавів здійснені на зразках, одержаних за даних умов.

Метод визначення вмісту Ti^{4+} в плавах

Кількісний вміст Ti^{4+} визначали пероксидним колориметричним методом за допомогою

фотоколориметра КФК-2МП при довжини хвилі 400 нм у кюветі з довжиною оптичного шляху $1,0\text{ см}$ [13]:

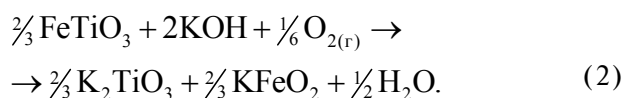


Результати та обговорення

З Іршанського родовища був відібраний зразок мінералу, який був використаний для досліджень. Для повної характеристики відібраного зразка було досліджено його хімічний склад. За даними скануючої електронної мікроскопії (таблиця), виконаними в Інституті геологічних наук НАН України (м. Київ), мінерал з Іршанського родовища (Житомирська обл.), за хімічним складом належить до лейкоксенізованого ільменіту (рис. 1). Про це свідчить досить високий середній вміст титану ($\sim 79\% TiO_2$). Результати рентгенографічного аналізу ільменіту надані на рис. 1.

За допомогою програмного забезпечення «MATCH!3» з використанням бази даних PCPDFWIN на дифрактограмі ідентифіковано основні рефлекси $FeTiO_3$ [96-900-0907], що розміщені при $23,80^\circ$; $32,52^\circ$; $35,25^\circ$; $48,71^\circ$ та $53,03^\circ$ 2θ кутах. Рефлекси при кутах $23,89^\circ$; $28,37^\circ$; $31,01^\circ$ та $38,20^\circ$ відповідають фазам псевдорутилу $Fe_2Ti_3O_9$ [00-019-0635]. Також ідентифіковано, що при $26,52^\circ$; $35,25^\circ$; $41,20^\circ$; $54,30^\circ$ та $56,60^\circ$ 2θ кутах ідентифікується фаза TiO_2 [96-153-0151].

Згідно з літературними даними, за температури понад 623 К реакція взаємодії ільменіту та луку відбувається з утворенням феритів [14]:



Проте, в умовах нашого експерименту температура одержання плавів $FeTiO_3$ з КОН та TiO_2 з КОН становила 453 К за атмосферного тиску. При цьому спостерігалось утворення окремої мінеральної фази – Fe_2O_3 , як результату окиснення FeO – однієї з складових частин кристалічної решітки ільменіту, киснем повітря. Тому,

Результати рентгеноспектрального аналізу зразку ільменіту Іршанського родовища

Елемент	Середній вміст елемента (ат. %)	Середній вміст елемента (мас. %)	Оксид елемента	Середній вміст оксиду в мінералі (%)
Fe	7,88	15,56	FeO	20,02
Ti	27,86	47,49	TiO_2	79,21
Sn	0,06	0,26	SnO	0,33
V	0,14	0,25	V_2O_5	0,45
O	64,07	36,45		

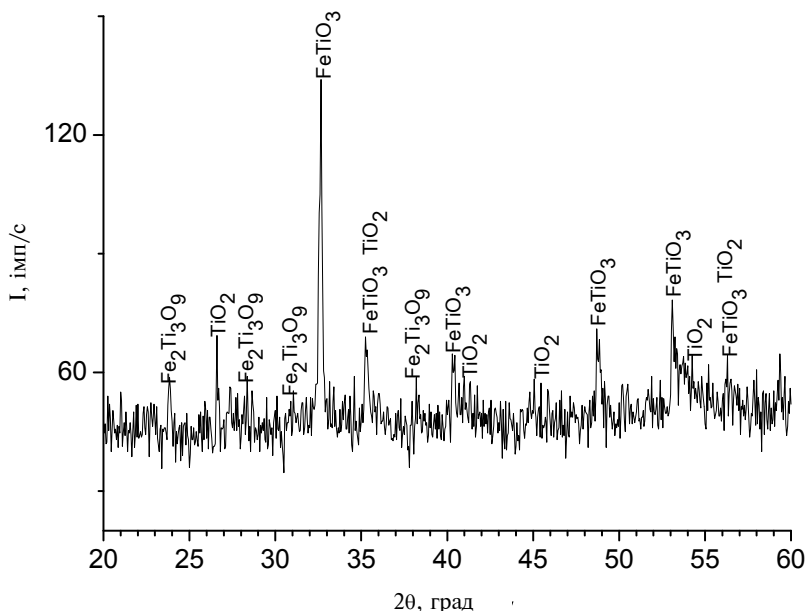
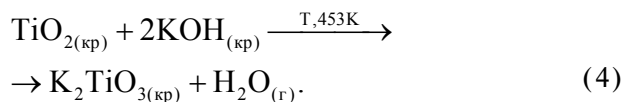
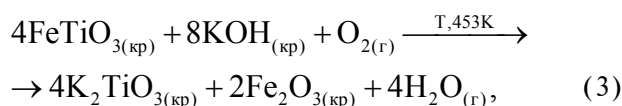


Рис. 1. Дифрактограма ільменітового концентрату

згідно з отриманими результатами, реакція протікає за рівняннями (3) та (4):

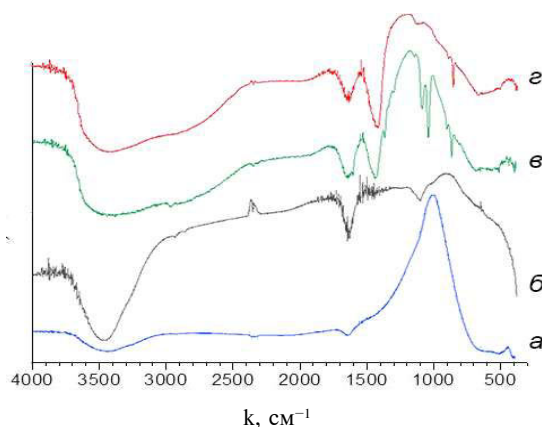


З метою більш детального вивчення хімізму процесу плавлення ільменіту з лугом, було здійснено ІЧ-спектроскопічні дослідження продуктів лужного вилуговування. На рис. 2 зображено ІЧ-спектри з використанням Фур'є перетворення TiO_2 (а), FeTiO_3 (б), плаву TiO_2 : KOH (1:2) (в), плаву FeTiO_3 : KOH (1:2) (г).

Широка смуга коливань в діапазоні 3500–3000 cm^{-1} на всіх спектрах досліджуваних речовин відповідає валентним і деформаційним коливанням адсорбованих (внутрішньокристалічних) молекул води. При 2350 cm^{-1} ідентифіковано поглинутий з повітря CO_2 поверхнею ільменіту (рис. 2,б).

В діапазоні 1600–700 cm^{-1} спектру TiO_2 (рис. 2,а) спостерігається широка смуга поглинання з максимумом близько 1000 cm^{-1} . Її можна віднести до валентних коливань, обумовлених наявністю зв'язків $\text{Ti}-\text{O}$ в октаедрах TiO_6 .

Крім того, в ІЧ-спектрах плавів в інтервалі 1600–1400 cm^{-1} з'являються дублети (рис. 2,в,г),

Рис. 2. ІЧ-спектри з використанням Фур'є перетворення TiO_2 (а), FeTiO_3 (б), плаву TiO_2 : KOH (1:2) (в), плаву FeTiO_3 : KOH (1:2) (г)

що свідчать про утворення зв'язків $\text{K}-\text{O}-\text{Ti}$.

В плавах та у вихідному TiO_2 при 450 cm^{-1} спостерігається смуга поглинання, що відповідає зв'язкам $\text{Ti}-\text{O}-\text{Ti}$ в структурі TiO_2 (рис. 2,а,в,г). Наявність в зразках іона TiO_3^{2-} характеризується валентними та деформаційними коливаннями в діапазоні спектра 938 cm^{-1} (рис. 2,в,г), що принципово відрізняє спектри одержаного плаву титанату калію (K_2TiO_3) від ільменіту [14]. Знижена інтенсивність смуги поглинання на цій ділянці для плаву ільменіту може бути пояснена тим, що, на відміну від чистого TiO_2 , ільменіт містить оксид заліза (FeO), який і обумовлює вказану відмінність ІЧ-спектрів.

В роботі [8] автори стверджують, що лужне

вилучення титану краще відбувається за температури 623 К при мольному співвідношенні ільменіту та калію гідроксиду 1:3. Однак, в ході проведення експерименту нами виявлено, що вилучення Ti^{4+} лужним плавленням відбувається навіть за температури 453 К при мольному співвідношенні компонентів 1:2 (рис. 3).

При більшому мольному співвідношенні компонентів реакція також відбувається, проте висока лужність не бажана – надмірне використання луку (KOH) призводить до надлишкового його накопичення у вигляді незадіяного реагенту.

Встановлено, що для переходу TiO_2 та $FeTiO_3$ в більш розчинну форму – TiO_3^{2-} достатньо нагріву за температури 453 К; при подальшому збільшенні температури нагрівання плаву ільменіту з лугом показано незначне підвищення виходу продукту (рис. 4,б), що є принциповим уточненням технологічної доцільності використання температури нагрівання плаву до 453 К. Останнє твердження передбачає суттєву економію електроенергії, що необхідна для нагріву реакційної суміші до температур, які традиційно використовуються у промисловій металургії титану (>623 К).

Висновки

В роботі досліджено процеси вилуговування титану з ільменіту Іршанського родовища. Виявлено, що особливістю даного мінералу є високий вміст (79%) титан(IV) оксиду.

Встановлено, що для лужного вилучення титану(IV) оптимальним мольним співвідношенням компонентів є 1:2 ($FeTiO_3:KOH$). Реакція утворення калій титанату до моменту затвердіння реакційної суміші перебігає протягом перших 30 хвилин нагріву за температури 453 К, що є суттєво нижчою у порівнянні з традиційними температурами, які використовуються у промисловій металургії титану.

Методами ІЧ-спектроскопії ідентифіковано основні рефлекси, які вказують на утворення у плаві ільменіту з калій гідроксидом за температури 453 К і мольному співвідношенні 1:2 титанату калію (K_2TiO_3) та перспективність використання даного лужного методу для вилучення Ti^{4+} з ільменіту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *A review of mineral processing of ilmenite by flotation* / Zhai J., Chen P., Sun W., Chen W., Wan S. // *Miner. Eng.* –

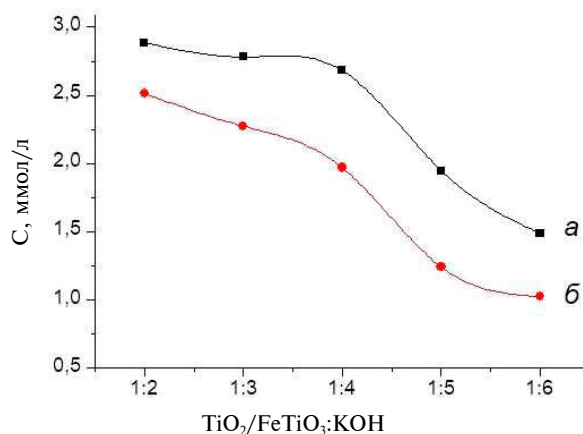


Рис. 3. Залежність концентрації вилученого Ti^{4+} від співвідношення вихідних компонентів $TiO_2:KOH$ (а), $FeTiO_3:KOH$ (б)

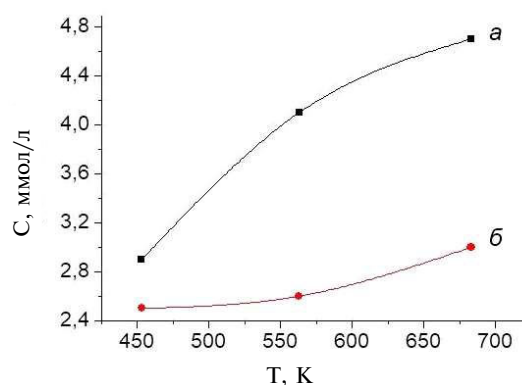


Рис. 4. Залежність концентрації вилученого Ti^{4+} від температури у реакційному середовищі $TiO_2:KOH$ (а) та $FeTiO_3:KOH$ (б) (мольне співвідношення 1:2)

2020. – Vol.157. – Art. No. 106558.

2. *Two stages of immiscible liquid separation in the formation of Panzhuhua-type Fe-Ti-V oxide deposits, SW China* / Zhou M.-F., Chen W.T., Wang C.Y., Prevec S.A., Liu P.P., Howarth G.H. // *Geosci. Front.* – 2013. – Vol.4. – P.481-502.

3. *Pownceby M.I., Sparrow G.J., Fisher-White M.J. Mineralogical characterisation of Eucla Basin ilmenite concentrates – first results from a new global resource* // *Miner. Eng.* – 2008. – Vol.21. – P.587-597.

4. *Лисенко О.А. Розсіпні родовища України. Стан освоєння та перспективи нарощування їхнього потенціалу* // *Збірник наук. праць УкрДГРІ.* – 2017. – № 3. – С.74-90.

5. *Производство двуокиси титана пигментной сульфатным способом* / Скомороха В.Н., Зареченный В.Г., Воробьева И.П., Вакал С.В. // *Суммы: АТЗТ «Арсенал-Пресс», 2002.* – 204 с.

6. *Sulfuric acid leaching of altered ilmenite using thermal, mechanical and chemical activation* / Dubenko A.V., Nikolenko M.V., Kostyniuk A., Likozar B. // *Minerals.* – 2020. – Vol.10. –

No. 6. – Art. No. 538.

7. *Mechanism*, thermodynamics and kinetics of rutile leaching process by sulfuric acid reactions / Dubenko A.V., Nikolenko M.V., Kostyniuk A., Likoza B. // *Processes*. – 2020. – Vol.8. – No. 6. – Art. No. 640.

8. *Extraction* of ultrafine titania from black sands broaden on the Mediterranean Sea coast in Egypt by molten alkalis / Fouda M.F.R., Amin R.S., Saleh H.I., Mousa H.A. // *Aust. J. Basic Appl. Sci.* – 2010. – Vol.4. – No. 9. – P.4256-4265.

9. *A modified* process for leaching of ilmenite and production of TiO₂ nanoparticles / Kordzadeh-Kermani V., Schaffie M., Rafsanjani H.H., Ranjbar M. // *Hydrometallurgy*. – 2020. – Vol.198. – Art. No. 105507.

10. *Subagja R., Andriyah L., Lalasari L.H.* Decomposition of ilmenite from Bangka Island – Indonesia with KOH solutions // *Asian Trans. Basic Appl. Sci.* – 2013. – Vol.3. – No. 2. – P.59-64.

11. *Yousef L.A.* Uranium adsorption using iron–titanium mixed oxides separated from ilmenite mineral, black sands, Rosetta, Egypt // *Arab. J. Nucl. Sci. Appl.* – 2017. – Vol.50. – P.43-57.

12. *Comparative* study of alkali roasting and leaching of chromite ores and titaniferous minerals / Parirenyatwa S., Escudero-Castejon L., Sanchez-Segado S., Hara Y., Jha A. // *Hydrometallurgy*. – 2016. – Vol.165. – P.213-226.

13. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. – 2-е изд. – М.: Ленинские горы, 1970. – 487 с.

14. *Potassium* titanate as heterogeneous catalyst for methyl transesterification / Gonzalez E.A.Z., Garcia-Guaderrama M., Villalobos M.R., Dellamary F.L., Kandhual S., Rout N.P., et al. // *Powder Technol.* – 2015. – Vol.280. – P.201-206.

Надійшла до редакції 07.11.2020

ALKALINE LEACHING OF TITANIUM FROM ILMENITE OF IRSHANSK DEPOSIT

S.V. Pysarenko^a, V.Yu. Chernenko^a, O.E. Chygyrynets^{a,}, O.M. Kaminskiy^b, M.O. Myronyak^c*

^a National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

^b Zhytomyr Ivan Franko State University, Zhytomyr, Ukraine

^c Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

* e-mail: corrosionlife@gmail.com

X-ray spectral studies of the chemical composition of Irshansk ilmenite concentrates showed that it is leukoxenized mineral with a high (up to 79%) content of titanium oxide and inclusions of pseudorutile. The process of alkaline leaching of Ti⁴⁺ from ilmenite is investigated in the work. The study of the temperature effect on the reaction of ilmenite with potassium hydroxide at atmospheric pressure revealed that a temperature of 453 K is sufficient to obtain potassium titanate. A further increase in temperature does not provide a significant increase in the yield of water-soluble titanium. It is found that the optimal and sufficient ratio between ilmenite and potassium hydroxide is 1:2. An increase

in the amount of potassium hydroxide in the reaction mixture is unsuitable, since it reduces the yield of soluble titanium and the final product will have a high alkalinity due to the presence of alkali which did not react. The main process of leaching with the formation of solid melt is completed in the first 30 minutes of the process. Infrared spectroscopy and X-ray diffraction showed that potassium titanate (K₂TiO₃) is formed under the studied conditions of alkaline leaching of ilmenite.

Keywords: ilmenite; alkaline leaching; potassium titanate; molar ratio; product yield.

REFERENCES

1. Zhai J, Chen P, Sun W, Chen W, Wan S. A review of mineral processing of ilmenite by flotation. *Miner Eng.* 2020; 157: 106558. doi: 10.1016/j.mineng.2020.106558.

2. Zhou MF, Chen WT, Wang CY, Prevec SA, Liu PP, Howarth GH. Two stages of immiscible liquid separation in the formation of Panzhihua-type Fe-Ti-V oxide deposits, SW China. *Geosci Front.* 2013; 4: 481-502. doi: 10.1016/j.gsf.2013.04.006.

3. Pownceby MI, Sparrow GJ, Fisher-White MJ. Mineralogical characterisation of Eucla Basin ilmenite concentrates – first results from a new global resource. *Miner Eng.* 2008; 21: 587-597. doi: 10.1016/j.mineng.2007.11.011.

4. Lysenko OA. Rozsypni rodovysycha Ukrayiny. Stan osvoennya ta perspektyvy naroshchuvannya yikhного potentsialu [Placer deposits of Ukraine: state of commercial development and prospects of increasing their potential]. *Zbirnyk Naukovykh Prats' UkrDGRI.* 2017; (3): 74-90. (in Ukrainian).

5. Skomorokha VN, Zarechennyi VG, Vorob'eva IP, Vakil SV. *Proizvodstvo dvoukisi titana pigmentnoi sul'fatnyy sposobom* [Production of pigmental titania by sulfate method]. Sumy: Arsenal-Press; 2002. 204 p. (in Russian).

6. Dubenko AV, Nikolenko MV, Kostyniuk A, Likoza B. Sulfuric acid leaching of altered ilmenite using thermal, mechanical and chemical activation. *Minerals.* 2020; 10(6): 538. doi: 10.3390/min10060538.

7. Dubenko AV, Nikolenko MV, Kostyniuk A, Likoza B. Mechanism, thermodynamics and kinetics of rutile leaching process by sulfuric acid reactions. *Processes.* 2020; 8(6): 640. doi: 10.3390/pr8060640.

8. Fouda MFR, Amin RS, Saleh HI, Mousa HA. Extraction of ultrafine titania from black sands broaden on the mediterranean sea coast in Egypt by molten alkalis. *Aust J Basic Appl Sci.* 2010; 4(9): 4256-4265.

9. Kordzadeh-Kermani V, Schaffie M, Rafsanjani HH, Ranjbar M. A modified process for leaching of ilmenite and production of TiO₂ nanoparticles. *Hydrometallurgy.* 2020; 198: 105507. doi: 10.1016/j.hydromet.2020.105507.

10. Subagja R, Andriyah L, Lalasari LH. Decomposition of ilmenite from Bangka Island – Indonesia with KOH solutions. *Asian Trans Basic Appl Sci.* 2013; 3(2): 59-64.

11. *Yousef LA.* Uranium adsorption using iron–titanium mixed oxides separated from ilmenite mineral, black sands, Rosetta, Egypt. *Arab J Nucl Sci Appl.* 2017; 50: 43-57.

12. Parirenyatwa S, Escudero-Castejon L, Sanchez-Segado S, Hara Y, Jha A. Comparative study of alkali roasting and leaching of chromite ores and titaniferous minerals. *Hydrometallurgy.* 2016; 165: 213-226. doi: 10.1016/j.hydromet.2015.08.002.

13. *Аринушкина Е.В. Рукководство по химическому анализу почв* [Guide to chemical analysis of soils]. Moscow: Leninskie Gory; 1970. 487 p. (in Russian).

14. Gonzalez EAZ, Garcia-Guaderrama M, Villalobos MR, Dellamary FL, Kandhual S, Rout NP, et al. Potassium titanate as heterogeneous catalyst for methyl transesterification. *Powder Technol.* 2015; 280: 201-206. doi: 10.1016/j.powtec.2015.04.030.