

# МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669. 292.3 : 669. 054. 82

Шубина М.В., Махоткина Е.С., Шубин И.Г., Емелюшин А.Н., Петроченко Е.В.

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБЖИГА И РЕАГЕНТОВ НА ИЗВЛЕЧЕНИЕ ВАНАДИЯ ИЗ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

**Аннотация.** Значительные объемы отходов горно-металлургического производства (рудные хвосты и металлургические шлаки) ухудшают экологическую обстановку промышленных регионов, но вместе с тем представляют собой уникальный источник многих технически ценных редких и рассеянных металлов, одним из которых является ванадий. Показаны перспективы по рынку ванадия (на спрос и цены) и оптимистичность прогнозов его потребления на ближайшие годы. В связи с этим включение в промышленную переработку ванадийсодержащих отходов решает одновременно две актуальные проблемы – ресурсосбережение и сохранность окружающей среды. Цель проведенного исследования – извлечение ванадия из рудных хвостов уральских титаномагнетитов и ванадийсодержащих шлаков металлургического производства разного химического состава с применением гидрометаллургического метода. Задачи исследования: определение влияния разных химических реагентов для обжига и температурных режимов этого процесса на степень извлечения ванадия; сравнение эффективности извлечения ванадия при водном и кислотном выщелачивании. Содержание ванадия в полученных растворах и твердых образцах определяли методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии (РФС). Анализ результатов исследования показал следующее: выбор реагентов и режимов обжига шихты с ванадийсодержащими отходами необходимо проводить с учетом их химического состава; наилучшими реагентами для обжига являются  $\text{NaCl}$  и  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ; наибольшие степени извлечения ванадия составили почти 75–92% и получены при содержании в шихте 50% реагента для обжига, после обжига при температуре 950°C и последующего водного или кислотного выщелачивания.

**Ключевые слова:** титаномагнетитовая руда, хвосты, металлургические шлаки, ванадий, обжиг, выщелачивание, степень извлечения ванадия

### Введение

На территории России в настоящее время накоплено около 80 млрд т техногенных отходов, среди которых значительную часть составляют хвосты рудных месторождений и шлаки металлургического производства. Наибольшие объемы таких отходов расположены в Уральском федеральном округе с развитой инфраструктурой горно-металлургической промышленности (на долю Свердловской области приходится до 30% отходов в РФ) [1]. Вместе с тем отходы горно-металлургического производства представляют собой уникальный источник многих технически ценных редких и рассеянных металлов, одним из которых является ванадий [2]. Ванадийсодержащие отходы – это побочные продукты переработки комплексных титаномагнетитовых железных руд. В таком техногенном сырье происходит накопление значительного количества токсичных и потенциально опасных элементов [3]. В связи с этим включение в промышленную переработку ванадийсодержащих отходов решает одновременно две актуальные проблемы – ресурсосбережение и сохранность окружающей среды. К положительным факторам, способствующим снижению затрат на освоение ванадийсодержащих техногенных ресурсов, можно отнести следующие:

– расположение отвалов с отходами на территориях с развитой промышленной и транспортной ин-

фраструктурой;

- размещение техногенного сырья на земной поверхности, а не в недрах;
- раздробленное состояние материалов отходов;
- рост цен на рынке ванадия.

В связи с дефицитом ванадия его общая рыночная цена увеличилась в 2018 году более чем на 30% для феррованадия и на 70% для оксида ванадия (V), и ожидается сохранение тенденции роста цен на ближайшие годы [4]. Это связано с введением новых стандартов на стальную арматуру с большим количеством ванадия и возрастающий спрос на сталь с высокой прочностью на растяжение. В процессе восстановления мирового производства стали после пандемии COVID-19 потребление ванадия увеличилось и к 2021 году уже составило 118000 т [5]. Значительный спрос на этот металл связан с расширением применения ванадиевых аккумуляторных батарей. Оценка специалистов (Atlantic) показывает, что на данный сектор потребления к 2025 году будет приходиться до 50% спроса на ванадий, а напряженность рынка ванадия прогнозируется до 2024 года вследствие роста как традиционных, так и новых потребителей этого металла [6–8].

В связи с оптимистичностью прогнозов по рынку ванадия (на спрос и цены) актуальным является исследование возможности утилизации ванадийсодержащих техногенных ресурсов для расширения сырьевой базы ванадия и улучшения экологической обстановки промышленных регионов [9–12]. Цель проведенного исследования – извлечение ванадия из руд-

ных хвостов уральских титаномагнетитов и ванадий-содержащих шлаков металлургического производства разного химического состава с применением гидрометаллургического метода. Достижение поставленной цели осуществлялось решением следующих задач: определение влияния разных химических реагентов для обжига и температурных режимов этого процесса на степень извлечения ванадия; сравнение эффективности извлечения ванадия при водном и кислотном выщелачивании.

### Материалы и методы исследования

Исследование проводили с использованием следующего ванадийсодержащего техногенного сырья: рудные хвосты уральских титаномагнетитов и металлургические шлаки (1, 2 и 3), среди которых шлаки 1 и 2 – производственные, а шлак 3 получен в лабораторных условиях в процессе выплавки ванадиевого чугуна из концентрата Уральской титаномагнетитовой руды.

Гидрометаллургическое извлечение ванадия из указанных материалов проводили в две стадии:

- окислительный обжиг шихты (исследуемый материал + реагент для обжига в переменных количественных соотношениях) при разных температурах;
- водное и кислотное выщелачивание спека для перевода ванадия в виде ванадата в получаемый раствор [13, 14].

Для определения содержания ванадия в исследуемых образцах применяли метод рентгенофлуоресцентной спектроскопии (РФС), реализуемый с помощью энергодисперсионного спектрометра [15].

Для исследования рудного техногенного сырья использовали образцы рудных хвостов уральских титаномагнетитов разного химического состава (табл. 1) [16].

В качестве реагентов для обжига (реакционные добавки) применяли хлорид натрия NaCl, соду – карбонат натрия Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, оксид кальция CaO, сульфат натрия Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и их смеси в разных количественных соотношениях в шихте. Окислительный обжиг проводили при температурах в диапазоне 700–950°C.

Таблица 1

Химический состав образцов рудных хвостов Уральских титаномагнетитов

Обозначение образца	Массовая доля, %								
	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	P	Fe <sub>общ.</sub>
№1	<b>0,15</b>	6,36	5,07	35,6	0,1	15,3	0,11	0,1	13,8
№2	<b>0,29</b>	12,02	3,81	31,7	0,12	10,6	0,12	-	17,81
№3	<b>0,36</b>	9,44	3,12	28,6	0,3	10,0	0,11	-	22,89
№4	<b>0,53</b>	7,52	1,93	22,4	0,52	8,7	0,08	-	30,60

В окислительном обжиге шихты из рудных образцов с NaCl использовали разное количество этого реагента – 37 и 50% от общей массы шихты. Шихту обжигали и охлаждали в муфельной печи, а перед выщелачиванием полученный спек измельчали. Вы-

щелачивание проводили в две ступени при температурах 60–78°C: водное – в течение 2 часов и кислотное раствором серной кислоты H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (pH = 1) – в течение 1 часа.

Для исследования ванадийсодержащих металлургических шлаков использовали образцы с разным химическим составом (табл. 2) [17].

Таблица 2

Химический состав образцов металлургических шлаков

Образцы шлака	Массовая доля, % (не более)							
	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	Fe
Шлак 1	<b>18,0</b>	12,0	8,0	15,0	5,0	14,0	5,83	1,5
Шлак 2	<b>1,02-1,2</b>	17,1-21,0	7,5-10,2	22,5-26,3	-	-	3,4-5,93	22,6-24,8
Шлак 3	<b>5,83</b>	2,67	-	21,3	0,38	1,5	2,95	39,9

В качестве реагентов для обжига применяли соду Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, количество которой в шихте варьировалось в разных опытах: 20, 33 и 50 % от общей массы шихты. Шихту из шлака с содой обжигали 1,5 часа при температурах в диапазоне 800–1100°C в разных опытах. После обжига спека, содержащего шлак 1 или 2 проводили водное выщелачивание в течение 1, 2 и 3 часов при разных температурах в диапазоне 50–80°C, а для спека со шлаком 3 – только кислотное выщелачивание.

### Результаты и их обсуждение

Проведенное исследование рудных хвостов уральских титаномагнетитов, химический состав которых приведен в табл. 1, показало взаимосвязь между степенью извлечения ванадия  $\alpha$  и содержанием ванадия в исходных образцах. Эта зависимость представлена на рис. 1 и получена в экспериментах с применением реакционной добавки NaCl для окислительного обжига.

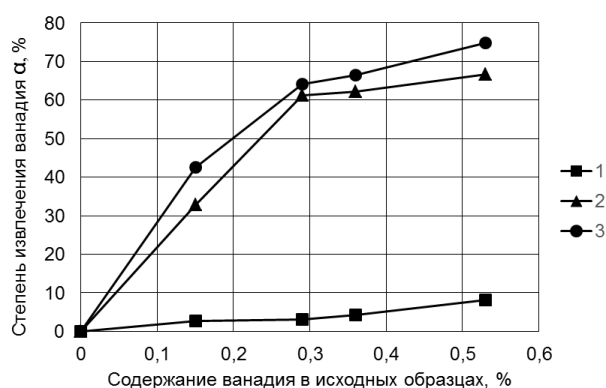


Рис. 1. Зависимость между степенью извлечения ванадия  $\alpha$  и исходным содержанием ванадия в рудных хвостах:

- 1 – после первой ступени выщелачивания (водное);
- 2 – после второй ступени выщелачивания (кислотное);
- 3 – после двухступенчатого выщелачивания

Согласно полученным результатам, увеличение содержания ванадия в образцах хвостов с 0,15 до 0,53% привело к возрастанию степени извлечения ванадия  $\alpha$  на 32%, то есть почти в 1,8 раза. Проведение двухступенчатого выщелачивания (1-я ступень – водное, 2-я ступень – кислотное) показало целесообразность выполнения только кислотного выщелачивания вследствие малого прироста  $\alpha$  (до 8%) при водном выщелачивании. Применение в качестве выщелачивающего агента  $H_2SO_4$  позволило получить  $\alpha$  около 75%.

Результаты исследования показали значительное влияние количественного содержания в шихте реагента для обжига ( $NaCl$ ) на степень извлечения ванадия из рудных хвостов. При увеличении содержания реагента в шихте с 37 до 50%  $\alpha$  возрастает почти на 20% практически во всех хвостах разного химического состава (рис. 2).

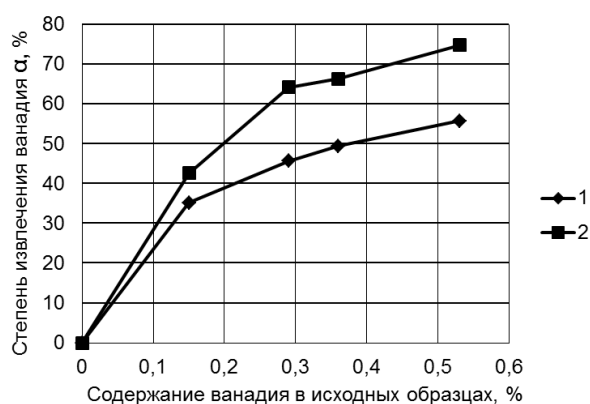


Рис. 2. Зависимость степени извлечения ванадия  $\alpha$  из рудных хвостов при разном содержании в шихте реагента  $NaCl$  для обжига:

- 1 – при содержании реагента в шихте 37%;
- 2 – при содержании реагента в шихте 50%

Наряду с реагентом  $NaCl$  для окислительного обжига в шихте использовали и другие реакционные добавки:  $CaO$ ,  $Na_2SO_4$ , смеси этих реагентов, в том числе смеси с  $NaCl$ . Они оказались неэффективны, поскольку полученная степень извлечения ванадия не превышала 28,5–31,2%. Вместе с тем применение реагента  $Na_2CO_3$  позволило существенно повысить  $\alpha$  до 70,75% для некоторых образцов хвостов.

В целом полученные в исследованиях невысокие степени извлечения ванадия из рудных хвостов могут быть связаны со значительным содержанием в них  $SiO_2$  (22,4–35,6%) (см. табл. 1), что негативно влияет на условия окисления материалов при обжиге шихты вследствие образования силиката натрия и спекания шихты [18, 19].

При исследовании рудных хвостов выявили существенную зависимость между степенью извлечения ванадия и температурой окислительного обжига (рис. 3). Возрастание этой температуры в диапазоне 700–950°C привело к увеличению  $\alpha$ , составившей 71% при использовании реагента  $NaCl$  и 75% при обжиге с ре-

агентом  $Na_2CO_3$ . При температуре 950°C получено наибольшее значение  $\alpha = 83,1%$  из шихты с  $Na_2CO_3$  (50% в шихте).

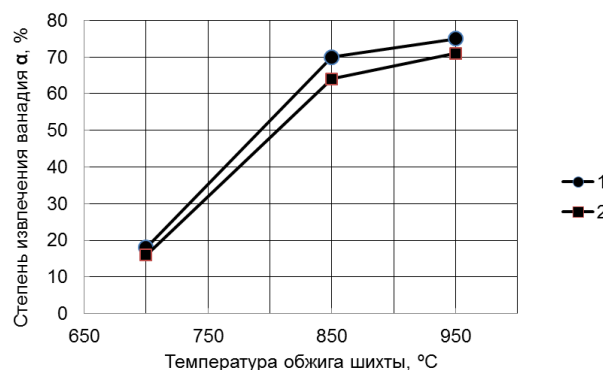


Рис. 3. Зависимость между степенью извлечения ванадия  $\alpha$  из рудных хвостов и температурой обжига шихты:

- 1 – хвосты с  $Na_2CO_3$  (содержание в шихте 50%);
- 2 – хвосты с  $NaCl$  (содержание в шихте 50%)

Исследование металлургических шлаков, имеющих разный химический состав (см. табл. 2), показало взаимосвязь между степенью извлечения ванадия и содержанием в шихте реагента для обжига  $Na_2CO_3$  (рис. 4). Увеличение количества  $Na_2CO_3$  в шихте в интервале значений 20–50%  $\alpha$  возрастает до 31% (шлак 2) и до 65% (шлак 1). При этом более низкие значения  $\alpha$  при обработке шихты со шлаком 2 связаны с высоким содержанием  $SiO_2$  (см. табл. 2) и переходом ванадия в стекловидную фазу, то есть нерастворимую форму, что затрудняет извлечение соединений ванадия при выщелачивании [18]. Кроме того, в составе шлака 2 отсутствует  $MnO$ , что тоже снижает степень извлечения ванадия [18, 20].

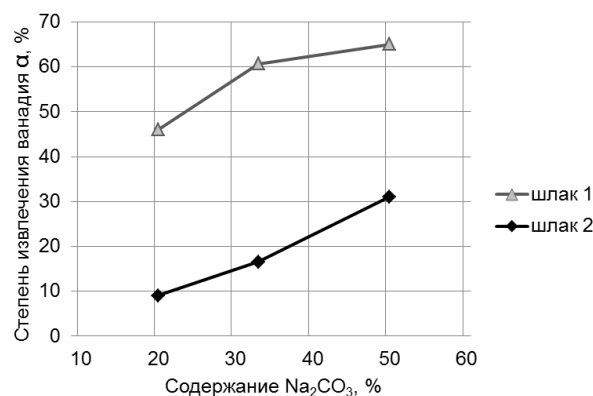


Рис. 4. Зависимость между степенью извлечения ванадия  $\alpha$  из шлаков и содержанием в шихте реагента  $Na_2CO_3$

По результатам экспериментов выявлена зависимость между степенью извлечения ванадия из шлаков разного химического состава и температурой окислительного обжига (рис. 5). Наилучшие результа-

ты по значению  $\alpha = 67\%$  (для шлака 1) и  $\alpha = 33\%$  (для шлака 2) получены после обжига при температуре  $950^\circ\text{C}$ . Более высокие температуры обжига приводят к переходу ванадия в химически связанное состояние в стекловидной фазе в виде соединения, содержащего  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{VO}_2$  и  $\text{SiO}_2$ , а также  $\text{Na}_2\text{CaSiO}_4$ , что негативно отражается на степени извлечения ванадия [21, 22].

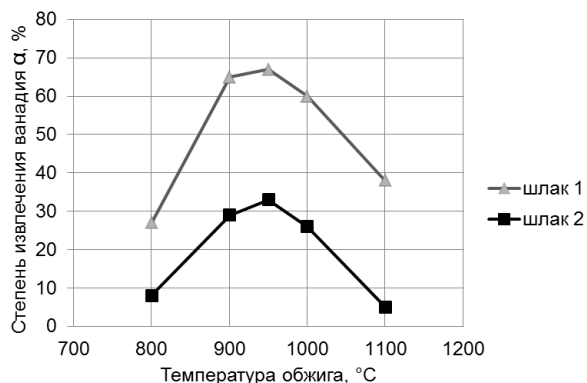


Рис. 5. Зависимость между степенью извлечения ванадия  $\alpha$  из шлаков и температурой обжига шихты

При исследовании шлака 3 (см. табл. 2) на возможность извлечения ванадия применяли два разных состава шихты: одна шихта включала навеску шлака и содовую добавку ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), а вторая – кроме указанных компонентов содержала еще дополнительный окислитель перманганат калия  $\text{KMnO}_4$ . После обжига шихты при температуре  $950^\circ\text{C}$  (1,5 часа) провели выщелачивание 20%-м раствором  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (1,5 часа). В результате экспериментов  $\alpha$  составила почти 92 %.

### Заключение

В результате проведенных исследований по гидрометаллургическому извлечению ванадия из техногенных ванадийсодержащих отходов горно-металлургического производства можно сделать следующие выводы:

- промышленная утилизация рудных хвостов уральских титаномагнетитов и металлургических шлаков обеспечит решение двух проблем – рациональное использование природных ванадийсодержащих ресурсов и сокращение территорий с опасными для окружающей среды отходами;
- при переработке ванадийсодержащих отходов необходимо учитывать их химический состав для выбора реагентов и режимов обжига;
- наилучшую эффективность в качестве реагентов для обжига шихты с исследованными материалами показали  $\text{NaCl}$  и  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ;
- применение в шихте с рудными хвостами реагента  $\text{NaCl}$  для обжига позволяет проводить одностадийное кислотное выщелачивание с  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , а увеличение в шихте содержания этого реагента способствует росту степени извлечения ванадия;

– химический состав рудных хвостов титаномагнетитов существенно влияет на степень извлечения ванадия: увеличение содержания ванадия с 0,15 до 0,53% приводит к росту степени извлечения почти до 75%;

– при извлечении ванадия из металлургического шлака необходимо рационально выбирать содержание реагента для обжига, режимы обжига и выщелачивающий агент: после обжига шихты с содержанием реагента 50% при температуре  $950^\circ\text{C}$  и последующего водного выщелачивания степень извлечения ванадия составила 33–67%, а проведение сернокислотного выщелачивания при тех же предшествующих условиях обработки обеспечило степень извлечения почти 92%.

### Список источников

1. Техногенное сырье – важнейший резерв развития: <http://rareearth.ru/ru/pub/20161025/02891.html>.
2. Разработка технологии переработки хвостов кусинских титаномагнетитовых руд с извлечением титана и ванадия / Бигеев В.А., Гришин И.А., Потапова М.В., Соколова Е.В. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докл. 76-й межд. науч.-техн. конф. Магнитогорск, 2018. Т.1. С. 93.
3. Шубина М.В., Махоткина Е.С. Исследование влияния режимов выщелачивания на степень извлечения ванадия из металлургических шлаков // Теория и технология металлургического производства. 2019. № 4 (31). С. 13-16.
4. Global Vanadium Market Size and Trends, By Application (Iron & Steel, Energy Storage, Chemical, And Titanium Alloys), By Region (Asia Pacific, Europe, North America, South America, Middle East and Africa) and Forecast from 2018 to 2025 // Metals and Minerals. Apr 2019: <http://www.adroitmarketresearch.com/industry-reports/vanadium-market>.
5. Terry Perles. Vanadium Market Analysis, TTP Squared, Inc. January 26, 2021: [https://www.ferroalloy.com/en/news/VANITEC%20ESC%20Market%20Data%20Jan%2022%202021%20\(002\).pdf](https://www.ferroalloy.com/en/news/VANITEC%20ESC%20Market%20Data%20Jan%2022%202021%20(002).pdf).
6. Upward momentum builds in vanadium market, February 18, 2021: <https://directorstalk.net/upward-momentum-builds-in-vanadium-market>.
7. Vanadium Miners News For The Month Of July 2021, July 29, 2021: <http://seekingalpha.com/article/4442508-vanadium-miners-news-for-the-month-of-july-2021>.
8. Обзор рынка ванадия и ванадийсодержащей продукции в СНГ. Изд. 5-е. Москва, 2009. [https://www.marketing-magazin.ru/imgs/goods/800/rynok\\_vanadija.pdf](https://www.marketing-magazin.ru/imgs/goods/800/rynok_vanadija.pdf).
9. Ancheta J. HYDRO-MPC technology for heavy oil refining // Journal of Mining Institute. 2017. № 224. С. 229-234.
10. Akhmetov A.F., et al. The state of vanadium (V) in crude oil and petroleum residues // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. №10(21). С. 42553-42555.



11. Mingyu Wang, Sheng Huang, Bianfang Chen, Xuewen Wang. A review of processing technologies for vanadium extraction from stone coal // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2018. С.90-98: <http://doi.org/10.1080/25726641.2018.1505207>.
12. Kologrieva U., Volkov A., Zinoveev D., Krasnyanskaya I., Stulov P. The Investigate of Vanadium-Containing Slurry Oxidation Roasting Process for Vanadium Extraction. December 2020: [http://www.researchgate.net/publication/347793726\\_The\\_Investigate\\_of\\_Vanadium-Containing\\_Slurry\\_Oxidation\\_Roasting\\_Process\\_for\\_Vanadium\\_Extraction](http://www.researchgate.net/publication/347793726_The_Investigate_of_Vanadium-Containing_Slurry_Oxidation_Roasting_Process_for_Vanadium_Extraction).
13. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Извлечение ванадия из шлака процесса ИТМКЗ // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тез. докладов. Магнитогорск, 2013. № 1. С. 168-171.*
14. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Извлечение титана из шлака процесса прямого восстановления титаномагнетитов // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тез. Докладов. Магнитогорск, 2015. № 1. С. 255-258.*
15. Makhotkina E.S., Shubina M.V. Industrial, ecological and resource-efficient aspects of vanadium production and use of technogenic vanadium sources // *Solid State Phenomena*. 2017. № 265. С. 994 – 998.
16. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Результаты экспериментов по извлечению ванадия из отходов обогащения титаномагнетитовых руд Кусинского месторождения // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2019. Т. 75. № 5. С. 617–623.
17. Шубина М.В., Махоткина Е.С. Рециклинг ванадийсодержащих отходов // *Теория и технология металлургического производства*. 2016. № 2 (19). С. 71–73.
18. Зеликман А.Н., Коршунов Б.Г. *Металлургия редких металлов*. М.: Металлургия, 1991. 432 с.
19. Zhang Y.M., Bao S.X., Lio T., Chen T.J., Huang J. The technology of extracting vanadium from ston coal in China, History, current status and future prospects. // *J. Hydrometallurgy*. 2011. Vol. 109. Pp. 116–124.
20. Mahdavian A. Recovery of vanadium from Esfahan Steel Company steel slag; optimizing of roasting and leaching parameters / A. Mahdavian, A. Shafyei, E. Keshavarz Alamdari, D.F. Haghshenas // *International Journal of ISSI*. 2006. Vol. 3. № 2. Pp. 17–21.
21. Комплексная переработка ванадиевого сырья: химия и технология / В.Г. Мизин, Е.М. Рабинович, Т.П. Сирина, В.Г. Добош, М.Е. Рабинович, Т.И. Красненко. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 500 с.
22. Song Wen-chen, Li Hong. A new process for vanadium extraction from molten vanadium slag by direct oxidation and sodium activating method // *Iron Steel Vanadium Titanium*. 2012. No.33 (6). Pp. 1–5.

#### Сведения об авторах

**Шубина Марианна Вячеславовна** – кандидат технических наук, доцент кафедры МиХТ, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [shubina\\_mar@mail.ru](mailto:shubina_mar@mail.ru)

**Махоткина Елена Станиславовна** – кандидат технических наук, доцент кафедры МиХТ, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

**Шубин Игорь Геннадьевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры ТОМ, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

**Емелюшин Алексей Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [emelushin@magtu.ru](mailto:emelushin@magtu.ru).

**Петроченко Елена Васильевна** – доктор технических наук, профессор кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### INFLUENCE OF ROASTING PARAMETERS AND REAGENTS ON THE VANADIUM EXTRACTION FROM TECHNOGENIC RAW MATERIALS

**Shubina Marianna V.** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Metallurgy and Chemical Technology Chair, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [shubina\\_mar@mail.ru](mailto:shubina_mar@mail.ru).

**Makhotkina Elena S.** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Metallurgy and Chemical Technology Chair, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Shubin Igor G.** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Materials Processing Technologies Chair, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Emelyushin Aleksei N.** – doctor of technical sciences, professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [emelushin@magtu.ru](mailto:emelushin@magtu.ru).

**Petrochenko Elena V.** – doctor of technical sciences, professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [evp3738@mail.ru](mailto:evp3738@mail.ru)

**Abstract.** Significant volumes of waste from mining and metallurgical production (ore tails and metallurgical slags) worsen the ecological situation in industrial regions, but at the same time, they represent a unique source of many technically valuable rare and trace metals, one of which is vanadium. The prospects for the vanadium market (in terms of demand and prices) and the optimism of its consumption forecasts for the coming years are shown. In this regard, the inclusion of vanadium-containing waste in industrial processing simultaneously solves two actual problems – resource saving and environmental protection. The study purpose is the vanadium extraction from the Ural titanomagnetite ore tails and vanadium-containing metallurgical slags of different chemical composition using the hydrometallurgical method. The study objectives are: to determine the effect of various chemical reagents and the temperature regimes for oxidizing roasting on the vanadium extraction degree; comparison of vanadium extraction efficiency in aqueous and acid leaching. The vanadium content in the resulting solutions and solid samples was determined by X-ray fluorescence spectroscopy (XFS). The study result analysis showed the following: the choice of reagents and roasting regimes of the charge with vanadium-containing waste must be carried out taking into account their chemical composition; the best roasting reagents are NaCl and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>; the highest vanadium extraction degree amounted to almost 75–92 % and were obtained with a 50 % roasting reagent content in the charge, after roasting at a temperature of 950 °C and subsequent aqueous or acid leaching.

**Keywords:** titanomagnetite ore, ore enriched tails, metallurgical slags, vanadium, oxidizing roasting, vanadium leaching, vanadium extraction degree.

---

Ссылка на статью:

Влияние параметров обжига и реагентов на извлечение ванадия из техногенного сырья / М.В. Шубина, Е.С. Махоткина, И.Г. Шубин, А.Н. Емельюшин, Е.В. Петроченко // Теория и технология металлургического производства. 2023. №3(46). С. 4-9.  
Shubina M.V., Makhotkina E.S., Shubin I.G., Emelyushin A.N., Petrochenko E.V. Influence of roasting parameters and reagents on the vanadium extraction from technogenic raw materials. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2023, vol. 46, no. 3, pp. 4-9.