

УДК 553.494.311

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ РУД СУРОЯМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

*Потапова М.В., к.т.н., доцент кафедры металлургии и химических технологий (marina\_potapova8@mail.ru)*

*Бигеев В.А., д.т.н., профессор кафедры металлургии и химических технологий (v.bigeev11@yandex.ru)*

*Харченко А.С., к.т.н., заведующий кафедрой металлургии и химических технологий (as.mgtu@mail.ru)*

*Потапов М.Г., к.т.н., доцент кафедры металлургии и химических технологий*

*Соколова Е.В., аспирант кафедры металлургии и химических технологий (katish\_moon@mail.ru)*

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова  
(455000, Россия, Челябинская обл., Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

**Аннотация.** Разведанные запасы титаномагнетитовых руд Суоямского месторождения в Челябинской области составляют 11 млрд т. Для их добычи и переработки актуально строительство нового металлургического предприятия. Наиболее перспективной схемой получения металла на планируемом производстве является традиционная, состоящая из следующих этапов: добычи руды, ее обогащения, производства из концентратов агломерата и окатышей, выплавки чугуна в доменных печах и получения стали в кислородном конверторе. Для установления основных технологических параметров нового производства в лабораторных условиях Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова изучены процессы выплавки чугуна из агломерата, полученного из титаномагнетитовых руд Суоямского месторождения и его последующей деванадации с получением ванадиевого шлака, пригодного для производства феррованадия. Отработана технология выплавки чугуна из агломерата, полученного из концентрата Суоямского месторождения, и последующей его деванадации с получением двух продуктов – передельного чугуна и ванадиевого шлака. Установлено, что при выплавке чугуна целесообразно получение ванадия в нем не менее 0,22 %. Найдены зависимости основного показателя эффективности деванадации – содержания оксида ванадия в шлаке от концентрации ванадия в чугуне и количества шлака. Подтверждена принципиальная возможность проведения деванадации экспериментального Суоямского чугуна с получением ванадиевого шлака, содержащего до 12 %  $V_2O_5$  с применением в качестве окислителя воздушного дутья.

**Ключевые слова:** титаномагнетитовая руда, Суоямское месторождение, агломерат, химический состав, чугун, деванадация, ванадиевый шлак.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-3-4-225-230

### ВВЕДЕНИЕ

Ванадий является одним из наиболее ценных легирующих элементов. Вопрос его влияния на свойства стали получил широкое освещение в работах многих авторов [1 – 7]. Свойства стали улучшаются уже при небольших концентрациях ванадия (0,01 – 0,05 %).

Известно, что главным источником ванадия для черной металлургии являются комплексные железные титаномагнетитовые руды [8 – 13]. В Российской Федерации месторождения ванадийсодержащих магнетитовых руд – Качканарское, Медведевское, Холинское находятся на Среднем Урале [14 – 16]. В относительной близости от Качканарского находится другое крупное месторождение ванадийсодержащего титаномагнетита – Суоямское (11 млрд т), освоение которого может еще больше расширить отечественное ванадиевое производство. Однако освоение этого месторождения потребует строительства не только карьера и обогати-

тельной фабрики, но и нового металлургического завода, который позволил бы получать ванадиевые шлаки. Таким образом, проблему Суоямского месторождения в будущем следует решать комплексно и вместе со строительством рудника и обогатительной фабрики создавать металлургический комбинат, производящий ванадийсодержащие шлаки.

Для определения основных технологических параметров нового производства на базе МГТУ были изучены процессы выплавки чугуна из агломерата, полученного из титаномагнетитовых руд Суоямского месторождения и его дальнейшей деванадации с получением ванадиевого шлака, пригодного для производства феррованадия.

### ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ

На первом этапе исследований Суоямскую руду подвергали обогащению: одной стадии сухой и двум

стадиям мокрой магнитной сепарации. Химический состав полученного агломерата приведен в табл. 1.

При проведении лабораторных экспериментов на следующем этапе ставилась задача выплавить ванадиевый чугун, пригодный для дальнейшей деванадации в достаточном количестве (не менее 3 – 5 кг). Исследование процесса восстановления Суroyамского агломерата заключалось в его моделировании в лабораторной индукционной печи ИСТ-006.

В лабораторных условиях удалось не только получить ванадиевый чугун, но и осуществить его деванадацию. Процесс окисления ванадия вели в шамотном тигле, помещенном в индукционной печи ИСТ-0.002. В качестве окислителя использовалось воздушное дутье.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Расчет процесса восстановления Суroyамского агломерата был выполнен для следующих условий: в качестве восстановителя принимался коксик производства ПАО «ММК» (84,15 % С; 0,3 % S; 0,35 % H<sub>2</sub>O; 12,49 % зола, 3,02 % летучие), в качестве флюса использовалась известь Агаповского месторождения. Расчет процесса восстановления велся на 100 кг агломерата.

Расчетный химический состав и количество чугуна и шлака приведены в табл. 2.

На этапе лабораторных исследований для получения достаточного количества чугуна было проведено пять

плавов. Температура процесса достигала 1500 °С. Расход агломерата на плавку составлял 1500 – 1750 г, коксика – 500 – 750 г, извести – 80 – 200 г. В каждой плавке получали в среднем от 1000 до 1150 г чугуна и от 450 до 950 г шлака. Химический состав чугуна и шлака опытных плавов представлен в табл. 3, 4.

С помощью математического моделирования были определены основные параметры деванадации чугуна. Важнейшим параметром является количество образующегося шлака, которое определяли по формуле [17, 18]

$$g_{\text{шл}} = \frac{100(1,62 + 1,78[V]_{\text{чуг}})}{100 - (\text{FeO})_{\text{общ}}} \tag{1}$$

Эта зависимость графически представлена на рис. 1. Другой ключевой параметр деванадации, содержание пентоксида ванадия в шлаке (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), может быть определен из выражения [11,12]

$$(V_2O_5)_k = \frac{[V]_{\text{чуг}} - [V]_{\text{кон}}}{0,56 \cdot 10^{-2} g_{\text{шл}}} \tag{2}$$

Графически последняя зависимость для остаточной концентрации ванадия в полупродукте [V]<sub>к</sub> = 0,035 % (среднее значение для условий ККЦ «ЕВРАЗ-НТМК») приведена на рис. 2.

В литейной лаборатории МГТУ им Г.И. Носова деванадацию чугуна проводили и следующим образом: в индукционную печь поместили 920 г опытного ва-

Таблица 1

**Химический состав агломерата, полученного из концентрата опытной партии руды Суroyамского месторождения, %**

Table 1. Chemical composition of the sinter obtained from the concentrate of Suroyamskoe deposit, %

Fe (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
62,6 (86,50)	2,36	4,51	2,22	1,90	1,11	0,19	0,24

Таблица 2

**Расчетный состав и количество чугуна и шлака**

Table 2. Calculated composition and quantity of the pig iron and slag

Чугун											
Единица измерения	C	Fe	Mn	Si	P	S	V	Ti	Итого		
кг	2,369	56,374	0,088	0,223	0,002	0,038	0,121	0,114	59,214		
%	4,000	95,203	0,149	0,377	0,003	0,064	0,204	0,193	100,000		
Шлак											
Единица измерения	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Итого
кг	8,95	4,30	1,27	4,76	2,24	0,76	0	1,67	1,71	0,02	25,68
%	34,85	16,76	4,93	18,54	8,71	2,96	0	6,51	6,66	0,09	100,00

Химический состав чугуна опытных плавков, % (по массе)

Table 3. Chemical composition of the pig iron after experimental melts, % (mass.)

Номер плавки	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	V
1	He опр.	0,43	0,290	0,022	0,018	0,06	0,055	0,050	0,023	0,36	0,135
2	He опр.	0,84	0,190	0,023	0,001	0,17	0,070	0,009	0,001	0,53	0,190
3	4,89	0,34	0,175	0,028	0,003	0,16	0,075	0,089	0,002	0,28	0,255
4	He опр.	0,28	0,440	0,030	0,017	0,13	0,072	0,013	0,041	0,41	0,330
5	He опр.	0,26	0,425	0,029	0,014	0,12	0,065	0,011	0,016	0,39	0,325

Химический состав шлака опытных плавков, % (по массе)

Table 4. Chemical composition of the experimental slags, % (mass.)

Номер плавки	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>общ</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	S	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	K <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	49,4	19,40	18,59	9,12	2,18	2,11	0,27	0,44	0,36	0,07	0,12
2	53,3	22,30	5,83	7,47	3,23	2,55	0,41	0,36	0,22	0,17	0,17
3	13,2	28,20	4,03	7,57	5,70	5,89	0,38	0,21	0,09	0,03	0,08
4	51,3	27,38	2,49	6,49	5,61	3,38	0,28	0,09	0,06	–	0,10
5	56,7	24,72	3,84	9,98	7,26	6,33	0,65	0,10	0,12	–	0,13

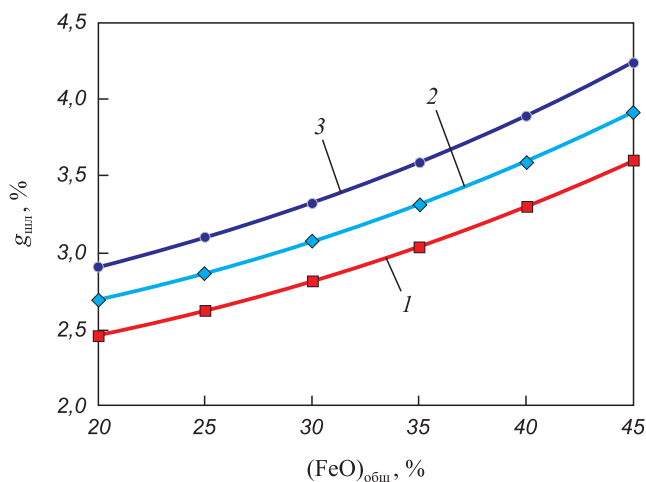


Рис. 1. Зависимость количества ванадиевого шлака  $g_{\text{шл}}$  от содержания в нем оксидов железа  $(\text{FeO})_{\text{общ}}$  и концентрации ванадия в чугуна  $[\text{V}]_{\text{чугр}}$ , %:  
1 – 0,2; 2 – 0,3; 3 – 0,4

Fig. 1. Dependence of the vanadium slag  $g_{\text{slag}}$  amount on the ferrum oxides content  $(\text{FeO})_{\text{total}}$  in it and concentration of vanadium in the pig iron  $[\text{V}]_{\text{чугр}}$ , %:  
1 – 0.2; 2 – 0.3; 3 – 0.4

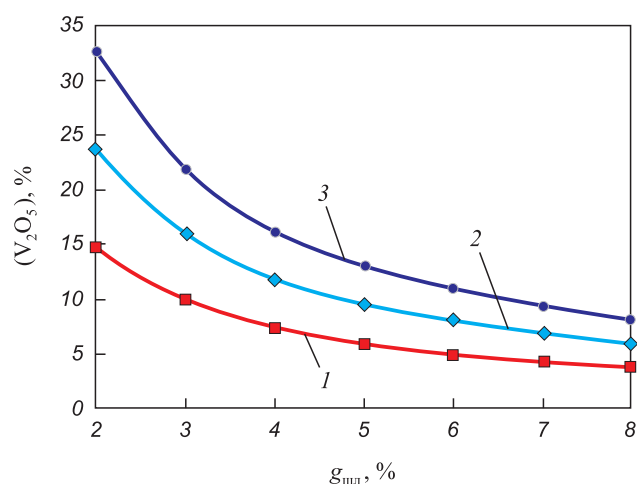


Рис. 2. Зависимость содержания оксида ванадия в шлаке  $(\text{V}_2\text{O}_5)_k$  от количества шлака  $g_{\text{шл}}$  и концентрации ванадия в чугуна  $[\text{V}]_{\text{чугр}}$ , %:  
1 – 0,2; 2 – 0,3; 3 – 0,4

Fig. 2. Dependence of content of the vanadium oxide in the slag  $(\text{V}_2\text{O}_5)_k$  on the slag amount  $g_{\text{slag}}$  and concentration of vanadium in the pig iron  $[\text{V}]_{\text{чугр}}$ , %:  
1 – 0.2; 2 – 0.3; 3 – 0.4

надиевого чугуна. Воздушное дутье подавалось через кварцевую трубку, к которой была прикреплена термопара. Интенсивность дутья составляла 150 л/мин, время продувки 7 мин. Дополнительно для обеспечения опти-

мальной температуры процесса (не выше 1400 °C) во время продувки в тигель подавались сурьямские окатыши (около 20 г). Масса металла-полупродукта на выходе составила 826 г, шлака – 42 г.

**Химический состав ванадиевого шлака после лабораторной деванадации, % (по массе)**

*Table 5. Chemical composition of vanadium slag after laboratory devanadation, % (mass.)*

Fe <sub>общ</sub>	SiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	MnO	MoO <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
31,2	21,6	13,7	4,02	4,21	3,58	2,88	2,26	0,57	0,46	0,17	0,07

**Химический состав полупродукта после деванадации, % (по массе)**

*Table 6. Chemical composition of the semi-product after devanadation, % (mass.)*

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	V
3,8	0,003	0,010	0,023	0,020	0,018	0,065	0,016	0,002	0,001	0,017

Химический состав ванадиевого шлака и полупродукта самой успешной плавки приведен в табл. 5, 6.

После того, как весь опытный ванадиевый шлак объединили, усредненное содержание V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> в нем составило 8,76 %. Затем методом кислотного выщелачивания, идентичным технологии, реализуемой на ПАО «Ванадий» [19, 20], была получена техническая пятиокись ванадия (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 90,16 %).

**Выводы**

По результатам проведенных исследований отработана технология выплавки чугуна из агломерата, полученного из концентрата Сураямского месторождения, и последующая его деванадация с получением двух продуктов: передельного чугуна и ванадиевого шлака.

Получены количественные характеристики конвертерного процесса деванадации, приведены зависимости основного показателя эффективности деванадации – содержания оксида ванадия в шлаке от таких параметров, как концентрация ванадия в чугуне и количество шлака.

Установлено, что при выплавке чугуна обеспечивается содержание ванадия в нем не менее 0,22 %. Это позволяет получить ванадиевый шлак, содержащий до 12 % V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Из такого шлака методом кислотного выщелачивания может быть получена техническая пятиокись ванадия с содержанием V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> более 90 %.

Полученные результаты могут служить убедительным подтверждением целесообразности вовлечения титаномагнетитовых руд Сураямского месторождения в промышленную переработку.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Ростокер У. *Металлургия ванадия* / Пер. с англ. – М.: Изд-во иностр. лит., 1959. – 194 с.
2. Ефимов Ю.В., Барон В.В., Савицкий Е.М. *Ванадий и его сплавы*. – М.: Наука, 1969. – 254 с.

3. Ванадий в черной металлургии / Н.П.Лякишев, Н.П. Слотвинский-Сидак, Ю.Л. Плинер и др. – М.: Металлургия, 1983. – 192 с.
4. Garcia-Mateo C., Morales-Rivas L., Caballero F.G. etc. Vanadium effect on a medium carbon forging steel // *Metals*. 2016. Vol. 6. No. 6. P. 130.
5. Pham M.K., Nguyen D.N., Hoang A.T. Influence of vanadium content on the microstructure and mechanical properties of high-manganese steel // *International Journal of Mechanical and Mechanics Engineering*. 2018. Vol. 18. No. 2. P. 141 – 147.
6. Gwon H., Kim J.-K., Shin S. etc. The effect of vanadium microalloying on the microstructure and the tensile behavior of TWIP steel // *Materials Science and Engineering: A*. 2017. Vol. 696. P. 416 – 428.
7. Sourmail T., Garcia-Mateo C., Caballero F.G. etc. The influence of vanadium on ferrite and bainite formation in a medium carbon steel // *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 2017. Vol. 48. No. 9. P. 3985 – 3996.
8. Chen S.Y., Chu M.S. A new process for the recovery of iron, vanadium, and titanium from vanadium titanomagnetite // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2014. Vol. 114. No. 6. P. 481 – 487.
9. Chen D., Zhao H., Hu G. etc. An extraction process to recover vanadium from low-grade vanadium-bearing titanomagnetite // *Journal of Hazardous Materials*. 2015. Vol. 294. P. 35 – 40.
10. Zhang Y.M., Wang L.N., Chen D.S. etc. A method for recovery of iron, titanium, and vanadium from vanadium bearing titanomagnetite // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2018. Vol. 25. No. 2. P. 131 – 144.
11. Gilligan R., Nikoloski A.N. The extraction of vanadium from titanomagnetites and other sources // *Minerals Engineering*. 2020. Vol. 146. P. 106.
12. Zhao L., Wang L., Qi T. etc. A novel method of extract iron, titanium, vanadium and chromium from high-chromium vanadium-bearing titanomagnetite concentrates // *Hydrometallurgy*. 2014. Vol. 149. P. 106 – 109.
13. Chen D., Zhao L., Liu Y. etc. A novel process for recovery of iron, titanium, and vanadium from titanomagnetite concentrates: NaOH molten salt roasting and water leaching process // *Journal of Hazardous Materials*. 2013. Vol. 244 – 245. P. 588 – 595.
14. Аликберов В.М., Ходина М.А., Чеботарева О.С. Состояние проблемы освоения и пути развития сырьевой базы черных металлов // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2017. № 4. С. 4 – 10.
15. Быховский Л.З., Пахомов Ф.П., Турлова М.А. Комплексные руды титаномагнетитовых месторождений России – крупная

- минерально-сырьевая база черной металлургии // Разведка и охрана недр. 2007. № 6. С. 20 – 23.
16. Ершова Е.В., Зублюк Е.В., Криштопа О.А. и др. Минерально-сырьевая база черных и легирующих металлов в России // Разведка и охрана недр. 2016. № 9. С. 88 – 95.
  17. Бигеев А.М., Колесников Ю.А. Основы математического описания и расчета кислородно-конвертерных процессов. – М.: Металлургия, 1970. – 229 с.
  18. Бигеев В.А., Носов С.К. Новые процессы производства и использования ванадиевых шлаков. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2000. – 106 с.
  19. Фофанов А.А., Новоселов А.М., Сухов Л.Л. Производство ванадиевой продукции в ОАО «Ванадий-Тула» // Металлург. 2005. № S1. С. 47 – 50.
  20. Пат. 2677197 РФ. МПК C22C 33/04. Способ получения феррованадия // А.С. Шаповалов, А.В. Полищук, Д.П. Черных и др.; заявл. 05.04.2019; опубл. 15.01.2019, Бюл. изобр. № 2.

Поступила в редакцию 26 февраля 2020 г.

После доработки 25 марта 2020 г.

Принята к публикации 27 марта 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. No. 3-4, pp. 225–230.

## REFINING TECHNOLOGY FOR TITANOMAGNETITE ORES FROM SUROYAMSKOE DEPOSIT

*M.V. Potapova, V.A. Bigeev, A.S. Kharchenko, M.G. Potapov, E.V. Sokolova*

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, Russia

**Abstract.** Explored reserves of titanomagnetite ores of Suroyamskoe deposit in Chelyabinsk region is equaled to 11 billion tons. Construction of a new metallurgical enterprise may be relevant for their production and processing. The most promising is the traditional scheme of metal production: ore mining, its crushing and enrichment, production of agglomerate and pellets from concentrates, smelting of pig iron in blast furnaces and steel production in oxygen converters. To establish basic technological parameters of the new production scheme, pig iron smelting from sinter obtained from titanomagnetite ores of Suroyamskoye deposit and its further devanadation (to produce vanadium slag suitable for the production of ferrovanadium) were studied in laboratory conditions of Nosov Magnitogorsk State Technical University. At the initial stage, a calculation was carried out, than experiments in laboratory conditions were made. As a result, the technology was developed for smelting pig iron from sinter obtained from concentrate of Suroyamskoe deposit and its subsequent devanadation to produce two products: pig iron and vanadium slag. It has been established that it is advisable to obtain vanadium in it at least of 0.22 % when smelting pig iron. Dependences of the main indicator of devanadation efficiency – the content of vanadium oxide in slag – on the concentration of vanadium in pig iron and the amount of slag were found. The fundamental possibility of de-exploitation of experimental Suroyamskii pig iron was confirmed with the production of vanadium slag containing up to 12 %  $V_2O_5$  with the use of air blast as an oxidizing agent.

**Keywords:** titanomagnetite ore, Suroyamskoe deposit, sinter, chemical composition, iron, devanadation, vanadium slag.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-3-4-225-230

### REFERENCES

1. Rostoker William. *The metallurgy of vanadium*. Chicago, 1958. (Russ. ed.: Rostoker W. *Metallurgiya vanadiya*. Moscow: Izd. inostr. lit., 1959, 194 p.)
2. Efimov Yu.V., Baron V.V., Savitskii E.M. *Vanadii i ego splavy* [Vanadium and its alloys]. Moscow: Nauka, 1969, 254 p. (In Russ.)
3. Lyakishev N.P., Slotvinskii-Sidak N.P., Pliner Yu.L. etc. *Vanadii v chernoii metallurgii* [Vanadium in ferrous metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 192 p. (In Russ.)
4. Garcia-Mateo C., Morales-Rivas L., Caballero F.G., Milbourn D., Sourmail T. Vanadium effect on a medium carbon forging steel. *Metals*. 2016, vol. 6, no. 6, pp. 130–132.
5. Pham M.K., Nguyen D.N., Hoang A.T. Influence of vanadium content on the microstructure and mechanical properties of high-manganese steel. *International Journal of Mechanical and Mechanics Engineering*. 2018, vol. 18, no. 2, pp. 141–147.
6. Gwon H., Kim J.-K., Shin S., Cho L., De Cooman B.C. The effect of vanadium micro-alloying on the microstructure and the tensile behavior of TWIP steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2017, vol. 696, pp. 416–428.
7. Sourmail T., Garcia-Mateo C., Caballero F.G., Cazottes S., Epicier T., Danoix F., Milbourn D. The influence of vanadium on ferrite and bainite formation in a medium carbon steel. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 2017, vol. 48, no. 9, pp. 3985–3996.
8. Chen S.Y., Chu M.S. A new process for the recovery of iron, vanadium, and titanium from vanadium titanomagnetite. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2014, vol. 114, no. 6, pp. 481–487.
9. Chen D., Zhao H., Hu G., Qi T., Yu H., Zhang G., Wang L., Wang W. An extraction process to recover vanadium from low-grade vanadium-bearing titanomagnetite. *Journal of Hazardous Materials*. 2015, vol. 294, pp. 35–40.
10. Zhang Y.M., Wang L.N., Chen D.S., Wang W.J., Liu Y.H., Zhao H.X., Qi T. A method for recovery of iron, titanium, and vanadium from vanadium bearing titanomagnetite. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2018, vol. 25, no. 2, pp. 131–144.
11. Gilligan R., Nikoloski A.N. The extraction of vanadium from titanomagnetites and other sources. *Minerals Engineering*. 2020, vol. 146, pp. 106.
12. Zhao L., Wang L., Qi T., Chen D., Zhao H., Liu Y. A novel method of extract iron, titanium, vanadium, and chromium from high-chromium vanadium-bearing titanomagnetite concentrates. *Hydrometallurgy*. 2014, vol. 149, pp. 106–109.
13. Chen D., Zhao L., Liu Y., Qi T., Wang J., Wang L. A novel process for recovery of iron, titanium, and vanadium from titanomagnetite concentrates: NaOH molten salt roasting and water leaching process. *Journal of Hazardous Materials*. 2013, vol. 244–245, pp. 588–595.
14. Alikberov V.M., Khodina M.A., Chebotareva O.S. Exploration and ways of developing the raw material base of ferrous metals. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*. 2017, no. 4, pp. 4–10. (In Russ.)
15. Bykhovskii L.Z., Pakhomov F.P., Turlova M.A. Complex ores of titanomagnetite deposits in Russia - a large mineral resource base of ferrous metallurgy. *Razvedka i okhrana neдр*. 2007, no. 6, pp. 20–23. (In Russ.)
16. Ershova E.V., Zublyuk E.V., Krishtopa O.A., Lapteva A.M., Remizova L.I., Rudnev A.V. Mineral resources base of ferrous and alloying metals in Russia. *Razvedka i okhrana neдр*. 2016, no. 9, pp. 88–95. (In Russ.)
17. Bigeev A.M., Kolesnikov Yu.A. *Osnovy matematicheskogo opisanija i rascheta kislorodno-konverternykh protsessov* [Fundamentals of mathematical description and calculation of oxygen-converter processes]. Moscow: Metallurgiya, 1970, 229 p. (In Russ.)
18. Bigeev V.A., Nosov S.K. *Novye protsessy proizvodstva i ispol'zovaniya vanadievnykh shlakov: monografiya* [New processes for the production and use of vanadium slag: Monograph]. Magnitogorsk: MG TU im. G.I. Nosova, 2000, 106 p. (In Russ.)

19. Fofanov A.A., Novoselov A.M., Sukhov L.L. Production of vanadium products at OJSC Vanadium-Tula. *Metallurg.* 2005, no. S1, pp. 47–50. (In Russ.).
20. Shapovalov A.S., Polishchuk A.V., Chernykh D.P., Il'inskikh A.A., Taldykin M.N. *Sposob polucheniya ferrovaniadiya* [The method of ferrovanadium production]. Patent RF no. 2677197, MPK S21S 33/04. *Bulleten' izobretenii.* 2019, no. 2. (In Russ.).

**Information about the authors:**

*M.V. Potapova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metallurgy and Chemical Engineering"*  
(marina\_potapova8@mail.ru)

*V.A. Bigeev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Metallurgy and Chemical Engineering"* (v.bigeev11@yandex.ru)

*A.S. Kharchenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metallurgy and Chemical Engineering"* (as.mgtu@mail.ru)

*M.G. Potapov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metallurgy and Chemical Engineering"*

*E.V. Sokolova, Postgraduate of the Chair "Metallurgy and Chemical Engineering"* (katish\_moon@mail.ru)

Received February 26, 2020

Revised March 25, 2020

Accepted March 27, 2020

---