

УДК 669.12.094.1

Бигеев В.А., Харченко А.С., Потапова М.В., Закуцкая Л.А., Щелоков Н.С., Посохин М.А., Потапов И.М., Киричко А.Д.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ДЕВАНАДАЦИИ ЧУГУНА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ РУД СУРОЯМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Аннотация. Разведанные запасы титаномагнетитовых руд Суроямского 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 конвертере. Ранее для установления основных технологических параметров нового производства в лабораторных условиях Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова были изучены процессы выплавки чугуна из агломерата, полученного из титаномагнетитовых руд Суроямского месторождения. В рамках настоящего исследования был изучен процесс деванадации чугуна с получением ванадиевого шлака, пригодного для производства феррованадия. Была отработана технология деванадации с получением двух продуктов -- передельного чугуна и ванадиевого шлака. В работе было 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 суроямского чугуна с получением ванадиевого шлака, содержащего до 12 % V_2O_5 с применением в качестве окислителя воздушного дутья.

Ключевые слова: титаномагнетитовая руда, Суроямское месторождения, агломерат, химический состав, чугун, деванадация, ванадиевый шлак

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 в ней (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 – Суроямское (11 млрд т), освоение которого может еще больше расширить отечественное ванадиевое производство. Однако освоение этого месторождения потребует строительства не только карьера и обогатительной фабрики, но и нового металлургического завода, который позволил бы получать ванадиевые шлаки. То есть проблему Суроямского 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 деванадации чугуна, выплавленного из Суроямского агломерата с получением ванадиевого шлака, пригодного для производства феррованадия.

Методы и результаты

На первом этапе исследований Суроямскую руду подвергали обогащению: одной стадии сухой и двум стадиям мокрой магнитной сепарации. Агломерат из полученного концентрата имел следующий химический состав (табл. 1).

Таблица 1

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

Fe (Fe_3O_4)	CaO	SiO ₂	MgO	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	V ₂ O ₅
62,6 (86,50)	2,36	4,51	2,22	1,90	1,11	0,19	0,24

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 суроямского агломерата заключались 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 шажотном тигле, помещенном в индукционной печи ИСТ-0.002. В качестве окислителя использовалось воздушное дутье.

Результаты исследований и их обсуждение

Расчет процесса восстановления суроямского агломерата был выполнен для следующих условий: в качестве восстановителя принимался коксик произ-

© Бигеев В.А., Харченко А.С., Потапова М.В., Закуцкая Л.А., Щелоков Н.С., Посохин М.А., Потапов И.М., Киричко А.Д., 2023

водства ПАО «ММК» (С – 84,15%, S – 0,3%, H₂O – 0,35%, зола – 12,49%, летучие – 3,02%), известь Агаповского месторождения использовалась в качестве флюса. 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 5 плавов. Температура процесса достигала 1500°C. Расход агломерата на плавку составил 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 опытных плавов представлен в табл. 3, а шлака – в табл. 4.

В работе математическим моделированием были определены основные параметры деванадации чугуна. Важнейшим параметром является количество образующегося шлака, его определяли по формуле [17, 18]

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

Эта зависимость графически представлена на рис. 1.

Другой ключевой параметр деванадации – содержание пентоксида ванадия в шлаке V₂O₅, может быть определен из выражения [11, 12]

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

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

В литейной лаборатории МГТУ им Г.И. Носова деванадацию чугуна проводили следующим образом. В индукционную печь поместили 920 г опытного ванадиевого чугуна. Воздушное дутье подавалось через кварцевую трубку, к которой была прикреплена термопара. Интенсивность дутья составляла 150 л/мин, время продувки 7 минут. Дополнительно для обеспечения оптимальной температуры процесса (не выше 1400°C) во время продувки в тигель подавались суроямские окатыши (около 20 г). Масса металла-полупродукта на выходе составила 826 г, шлака – 42 г.

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

Таблица 2

Расчетный состав и количество чугуна и шлака

Чугун											
	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		
Шлак											
	Fe ₃ O ₄ + Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	S	TiO ₂	V ₂ O ₅	Всего
кг	8,95	4,30	1,27	4,76	2,24	0,76	0,00	1,67	1,71	0,02	25,68
%	34,85	16,76	4,93	18,54	8,71	2,96	0,00	6,51	6,66	0,09	100,00

Таблица 3

Химический состав чугуна опытных плавов

Номер плавки	Массовая доля, %										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	V
1	не опр.	0,43	0,29	0,022	0,018	0,06	0,055	0,050	0,023	0,36	0,135
2	не опр.	0,84	0,19	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	не опр.	0,28	0,44	0,030	0,017	0,13	0,072	0,013	0,041	0,41	0,330
5	не опр.	0,26	0,425	0,029	0,014	0,12	0,065	0,011	0,016	0,39	0,325

Таблица 4

Химический состав шлака опытных плавов

Номер пробы	Массовая доля, %										
	CaO	SiO ₂	Fe _{общ}	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	S	V ₂ O ₅	MnO	K ₂ O	Cr ₂ O ₃
1	49,4	19,4	18,59	9,12	2,18	2,11	0,27	0,44	0,36	0,07	0,12
2	53,3	22,3	5,83	7,47	3,23	2,55	0,41	0,36	0,22	0,17	0,17
3	13,2	28,2	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

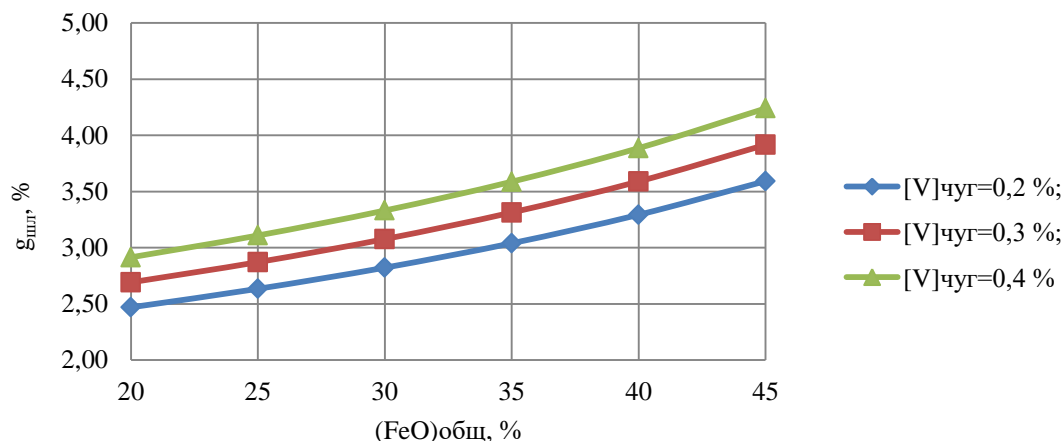


Рис. 1. Зависимость количества ванадиевого шлака $g_{шлл}$ от содержания в нем оксидов железа $(FeO)_{общ}$ и концентрации ванадия в чугунае $[V]_{чуг}$

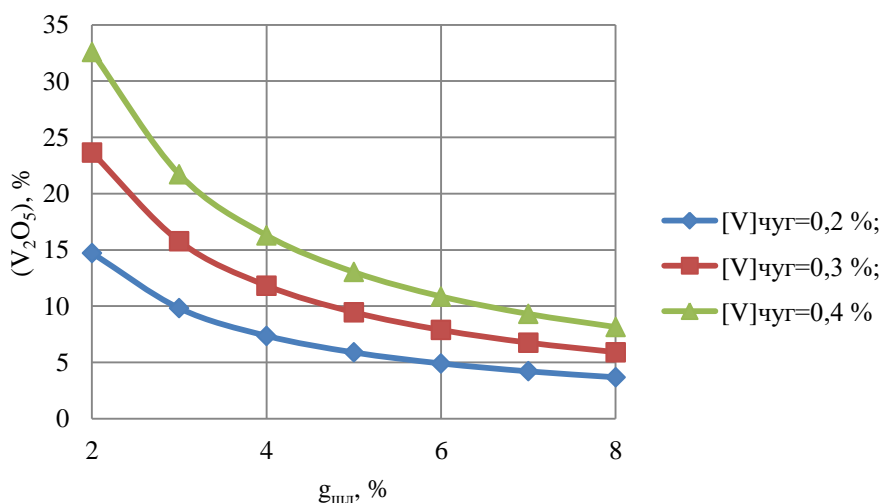


Рис. 2. Зависимость содержания оксида ванадия в шлаке $(V_2O_5)_к$ от количества шлака $g_{шлл}$ и концентрации ванадия в чугунае $[V]_{чуг}$

Таблица 5

Химический состав ванадиевого шлака после лабораторной деванадации

Массовая доля, %											
Fe _{общ}	SiO ₂	V ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MgO	MnO	MoO ₃	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	Nb ₂ O ₅
31,2	21,6	13,7	4,02	4,21	3,58	2,88	2,26	0,57	0,46	0,17	0,07

Таблица 6

Химический состав полупродукта после деванадации

Массовая доля, %										
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

После этого весь опытный ванадиевый шлак объединили, усредненное содержание V₂O₅ в нем составило 8,76%. Затем методом кислотного выщелачивания, идентичным технологии, реализуемой на ПАО «Ванадий» (г. Тула) [19, 20], была получена техническая пятиокись ванадия (V₂O₅ = 90,16 %).

Заключение

По результатам проведенных исследований была отработана технология выплавки чугуна из агломерата, полученного из концентрата Суоямского месторождения, и последующей его деванадации с получением двух продуктов: передельного чугуна и ванадиевого шлака.

Получены количественные характеристики конвертерного процесса деванадации, были 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_2O_5 .

Из такого шлака методом кислотного выщелачивания может быть получена техническая пятиокись ванадия с содержанием V_2O_5 более 90%.

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

Список литературы

1. Ростокер У. *Металлургия ванадия*: пер. с англ. / под ред. Е.М. Савицкого. М., 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., Milbourn D., Sourmail T. Vanadium effect on a medium carbon forging steel // *Metals*. 2016. Т. 6. № 6. С. 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. Т. 18. № 2. С. 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. Т. 696. С. 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. Т. 48. № 9. С. 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. Т. 114. № 6. С. 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. Т. 294. С. 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. Т. 25. № 2. С. 131-144.
11. Gilligan R., Nikoloski A.N. The extraction of vanadium from titanomagnetites and other sources // *Minerals Engineering*. 2020. Т. 146. С. 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. Т. 149. С. 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. Т. 244-245. С. 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. Минерально-сырьевая база черных и легирующих металлов в России / Е.В. Ершова, Е.В. Зублюк, О.А. Криштопа, А.М. Лаптева, Л.И. Ремизова, А.В. Руднев // *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: монография. 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 Российская Федерация, МПК C22C 33/04. Способ получения феррованадия / Шаповалов А.С., Полищук А.В., Черных Д.П., Ильинских А.А., Талдыкин М.Н.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «ЕВРАЗ Ванадий Тула» – № 2018112344; заявл. 05.04.2019; опубл. 15.01.2019, Бюл. № 2. 12 с.

Сведения об авторах

Бигеев Вахит Абдрашитович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: v.bigeev11@ya.ru

Харченко Александр Сергеевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: as.mgtu@mail.ru

Потапова Марина Васильевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: marina_potapova8@mail.ru

Закуцкая Любовь Анатольевна – аспирант кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: zakutskayalyuba@gmail.com

Щелоков Николай Сергеевич – магистр кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: mr.ekman@mail.ru

Потапов Иван Михайлович – студент кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: potapivan14@gmail.com

Посохин Михаил Андреевич – студент кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: posohinmichael@yandex.ru

Киричко Алексей Денисович – студент кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: kirichko.alexei@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF DEVANADATION TECHNOLOGY FOR IRON PRODUCED FROM SUROYAMSK DEPOSIT TITANOMAGNETITE ORES

Bigeev Vakhit A. – Professor of Metallurgy and Chemical Technologies Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation. E-mail: v.bigeev11@yandex.ru

Kharchenko Alexander S. – Head of Metallurgy and Chemical Technologies Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation. E-mail: as.mgtu@mail.ru

Potapova Marina V. – Ph.D. (Eng), Associate Professor of Metallurgy and Chemical Technologies Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation. E-mail: marina_potapova8@mail.ru

Zakutskaya Lyubov A. – postgraduate student of Metallurgy and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation. Phone: 8(3519)29-85-73. E-mail: zakutskayalyuba@gmail.com

Shchelokov Nikolay S. – master degree student of Metallurgy and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation. Phone: 8(3519)29-85-73. E-mail: mr.ekman@mail.ru

Posokhin Mikhail A. – bachelor degree student of Metallurgy and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; E-mail: posohinmichael@yandex.ru

Potapov Ivan M. – bachelor degree student of Metallurgy and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; E-mail: potapivan14@gmail.com

Kirichko Alesey D. – bachelor degree student of Metallurgy and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; E-mail: kirichko.alexei@yandex.ru

Abstract. The explored reserves of titanomagnetite ores at the Suroyamskoe deposit in the Chelyabinsk are equaled to 11 billion tons. For their extraction and processing, it is important to build a new metallurgical enterprise. The most promising scheme for obtaining metal is the traditional technology, consisting of the following stages: mining ore, its dressing, production of sinter and pellets from concentrates, smelting vanadium iron in blast furnaces and producing steel in an oxygen converter. Previously, to establish the basic technological parameters of the new production in laboratory conditions at Nosov Magnitogorsk State Technical University the processes of smelting vanadium iron from titanomagnetite sinter was studied. In this work, the process of devanadation of this iron was studied to obtain vanadium slag, suitable for the production of ferrovanadium. The technology of devanadation was developed to produce two products – iron and vanadium slag. It was found in the work that in the course of vanadium iron smelting it is necessary to obtain vanadium concentration at least 0.22%. The dependences of the main indicator of the efficiency of devanadation – the content of vanadium oxide in the slag on the concentration of vanadium in the cast iron and the amount of slag – were found. The fundamental possibility of carrying out devanadation of experimental Suroyamsky iron to produce vanadium slag containing up to 12% V_2O_5 using air blast as an oxidizer has been confirmed.

Keywords: titanomagnetic ore, Suroyamsky deposits, sinter, chemical composition, iron, devanadation, vanadium slag.

Ссылка на статью:

Разработка технологии деванадации чугуна, полученного из титаномагнетитовых руд Суроямского месторождения / В.А. Бигеев, А.С. Харченко, М.В. Потапова, Л.А. Закуцкая, Н.С. Щелоков, М.А. Посохин, И.М. Потапов, А.Д. Киричко // Теория и технология металлургического производства. 2023. №3(46). С. 19-24.

Bigeev V.A., Kharchenko A.S., Potapova M.V., Zakutskaya L.A., Shchelokov N.S., Posokhin M.A., Potapov I.M., Kirichko A.D. Development of devanadation technology for iron produced from Suroyamsk deposit titanomagnetite ores. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2023, vol. 46, no. 3, pp. 19–24.