

Научная статья
УДК 669.052
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.038

ПРОИЗВОДСТВО ТИТАНОВОГО ШЛАКА ИЗ ИЛЬМЕНитОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ КОРЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Владимир Андреевич Кобелев¹, Георгий Александрович Нечкин², Леонид Андреевич Смирнов³

^{1, 2, 3}Акционерное общество «Уральский институт металлов», Екатеринбург, Россия

¹kobelev_va@mail.ru

²ggg3686@gmail.com

³smirnov@uim-stavan.ru

Аннотация

Выполнены лабораторные исследования и расчеты процессов восстановления и плавки ильменитовых концентратов Медведевского, Куранахского и Гремяха-Вырмеского месторождений. Предложена двухстадийная технологическая схема, включающая восстановление ильменито-угольных брикетов в кольцевой печи и плавку горячих металлизированных брикетов в руднотермической печи с получением титанового шлака и чугуна. В результате исследований установлено, что получение брикетов с высокой степенью металлизации в кольцевой печи возможно в результате термообработки при температуре 1 400–1 500 °С в течение 15–30 мин. Применение двухстадийной схемы с предварительным восстановлением в кольцевой печи позволит снизить расход электроэнергии при выплавке титанового шлака из ильменитовых концентратов на 2 200–2 400 кВт·ч/т.

Ключевые слова:

ильменит, уголь, связующее, брикетирование, термообработка, вращающаяся печь, кольцевая печь, металлизация, плавление, руднотермическая печь, шлак, чугун

Для цитирования:

Кобелев В. А., Нечкин Г. А., Смирнов Л. А. Производство титанового шлака из ильменитовых концентратов коренных месторождений Российской Федерации // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 1. С. 214–219. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.038.

Original article

PRODUCTION OF TITANIUM SLAG FROM ILMENITE CONCENTRATES OF RAW DEPOSITS OF THE RUSSIAN FEDERATION

Vladimir A. Kobelev¹, Georgy A. Nechkin², Leonid A. Smirnov³

^{1, 2, 3}Ural Institute of Metals, Yekaterinburg, Russia

¹kobelev_va@mail.ru

²ggg3686@gmail.com

³smirnov@uim-stavan.ru

Abstract

Laboratory studies and calculations of the processes of reduction and smelting of ilmenite concentrates of the Medvedevskoe, Kuranakhskoe and Gremyakh-Vyrmeskoe deposits were carried out. A two-stage process flow chart is proposed, including the reduction of ilmenite-coal briquettes in a ring furnace and the smelting of hot metallized briquettes in an ore-thermal furnace to produce titanium slag and cast iron. As a result of the studies, it was found that the production of briquettes with a high degree of metallization in a ring furnace is possible as a result of heat treatment at a temperature of 1400–1500 °C for 15–30 minutes. The use of a two-stage scheme with preliminary reduction in a ring furnace reduces energy consumption during the smelting of titanium slag from ilmenite concentrates by 2200–2400 kW·h/t.

Keywords:

ilmenite, coal, binder, briquetting, heat treatment, rotary kiln, ring kiln, metallization, melting, ore-thermal furnace, slag, cast iron

For citation:

Kobelev V. A., Nechkin G. A., Smirnov L. A. Production of titanium slag from ilmenite concentrates of raw deposits of the Russian Federation // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 214–219. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.038.

В настоящее время уровень потребления диоксида титана в России соответствует 0,4 кг на душу населения, в индустриально развитых странах этот показатель составляет 4 кг, что для России соответствует годовой потребности в количестве 600 тыс. т. Основным сырьем для производства

диоксида титана является титановый шлак, производимый в руднотермических печах из ильменитового концентрата. Общее мировое производство ильменитового концентрата составляет 7,6–8,0 млн т/год, из них более 90 % используется для получения пигментного диоксида титана, остальное — для производства металлического титана [1].

Ильменитовые концентраты являются основным сырьем для производства оксида титана, а в РФ ильменитовые концентраты из руд коренных месторождений в настоящее время используются в ограниченном объеме. В РФ на различной стадии разработки находятся несколько ильменитовых месторождений коренного типа [2; 3]. Освоено и производится ильменитовый концентрат Куранахского месторождения, подготовлено к освоению Медведовское месторождение (Челябинская обл.) и месторождение Гремяха-Вырмес (Мурманская обл.) [4; 5]. Химический состав ильменитовых концентратов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав ильменитовых концентратов, мас. %

Месторождение	Элементы, оксиды										
	Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Cr ₂ O ₃
Куранахское	32,47	36,66	5,68	51,20	0,08	1,52	1,56	0,10	2,36	0,49	0,06
Медведовское	34,20	34,35	10,68	47,66	0,38	2,88	1,27	0,46	0,45	0,96	0,26
Гремяха-Вырмес	34,77	40,80	4,22	46,75	0,07	2,62	1,27	0,10	2,60	0,55	0,26

Куранахский ильменитовый концентрат, по сравнению с медведовским и гремяха-вырмесским, имеет более высокое содержание оксида титана и более низкое оксидов железа. Диоксид титана из титанового шлака производят в основном двумя способами: хлорным и сульфатным, и каждый способ предъявляет жесткие требования по содержанию в шлаке вредных примесей.

Титановый шлак производят в руднотермической электропечи путем углетермического восстановления оксидов железа и разделения жидкого металла и шлака. Процесс плавки периодический и включает загрузку шихты (ильменит и уголь), нагрев, восстановление железа, получение первичного шлака, доводка шлака, отстой с отделением металла, перегрев шлака и выпуск продуктов плавки. В этой технологии основным недостатком является восстановление оксидов железа в руднотермической печи за счет электроэнергии. Высокие температуры в печи приводят к преждевременному плавлению шихты с образованием высокожелезистого шлака, который вскипает и вынуждает останавливать нагрев. Чем выше содержание железа в ильменитовом концентрате, тем дольше длится плавка и выше расход электроэнергии. По данным работы [6] расход электроэнергии при маложелезистых концентратах составляет $7,8 \cdot 10^6$ кДж/т, а при высокожелезистых — $14,3 \cdot 10^6$ кДж/т шлака.

В целях устранения этого недостатка в разных странах используется двухстадийная технология переработки ильменитового концентрата. Процесс восстановления железа выделен в отдельную стадию и производится в отдельном агрегате, где тепловые затраты компенсируются за счет горения природного газа и продуктов восстановления железа. Углетермическое восстановление железа осуществляется при высокой температуре в твердом состоянии. Основные агрегаты для восстановления: трубчатые вращающиеся и кольцевые печи.

Металлизация ильменитовых концентратов во вращающихся печах требует их окускования, т. к. значительный пылеунос тонких фракций снижает технико-экономические показатели процесса. Узкофракционный состав ильменитовых концентратов также затрудняет производство прочных брикетов. При термообработке ильменитовых брикетов в пересыпающемся слое во вращающейся печи предъявляются высокие требования к их механической и термической прочности. В связи с этим важным элементом технологии является выбор связующего вещества при брикетировании.

Восстановление брикетов в неподвижном слое в кольцевой печи не предъявляет высоких требований к их прочности: брикеты должны выдерживать транспортировку и загрузку в печь без разрушения. В качестве вяжущих материалов при производстве брикетов для кольцевой

печи можно использовать «Полипласт», крахмал и мелассу. «Полипласт» содержит щелочи и серу, что также негативно отражается на составе титанового шлака. Крахмал и меласса не вносят в шихту вредных примесей, и их применение предпочтительно, но требуют дополнительной операции сушки перед использованием. Меласса имеет более низкую цену и ее следует рассматривать в качестве основного связующего вещества при производстве брикетов для кольцевой печи.

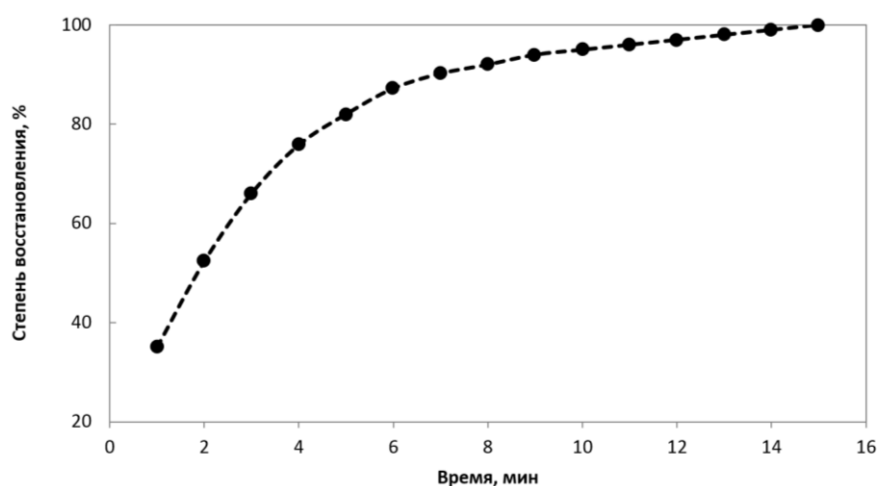
В качестве восстановителя железа в ильменитовых концентратах целесообразно использовать малозольный и малосернистый антрацит. При производстве брикетов антрацит измельчают, дозируют в необходимом количестве в шихту, перемешивают с ильменитом и связующим и брикетируют в валковом брикет-прессе.

Основным недостатком восстановления ильменита в трубчатой вращающейся печи является низкая скорость нагрева материала. Повышение скорости нагрева в условиях трубчатой печи не представляется возможным из-за высокого теплотребления восстановительных процессов и условий теплообмена.

Обязательным условием при углетермическом восстановлении ильменита является высокое содержание оксида углерода в газовой фазе. Отопление трубчатой вращающейся печи природным газом не позволяет регулировать содержание CO , а высокое содержание окислительных газов (O_2 , CO_2 и H_2O) определяет окислительный по отношению к металлическому железу характер газовой фазы. Таким образом, во вращающейся печи трудно достичь высокой степени восстановления железа в пересыпающемся слое, и брикетирование ильменита является обязательным условием. Внутри брикета при наличии углерода можно создать условия получения металлического железа даже при окислительном характере газовой фазы в трубчатой печи. Для защиты от вторичного окисления расход твердого восстановителя в шихту в этом процессе должен быть увеличен на 30–50 %.

Процесс металлизации в кольцевой печи не имеет указанных выше недостатков и характеризуется высокой температурой и высокой скоростью нагрева брикетов в монослое. Преимущественно радиационный характер нагрева уменьшает контакт брикетов с газовой фазой, при этом над слоем образуется защитный слой газа с высоким содержанием CO .

Лабораторные исследования металлизации ильменита по режиму кольцевой печи подтвердили эффективность этой технологии для первой стадии получения титанового шлака. В процессе исследования брикеты загружали в разогретую до 1 500 °С печь, выдерживали определенное время, вынимали и закаливали. Химическим анализом определяли степень восстановления железа. Результаты исследования кинетики восстановления ильменито-угольных брикетов приведены на рисунке.



Кинетика восстановления ильменито-угольных брикетов
из медведевского концентрата при 1 500 °С по режиму кольцевой печи

Процесс углестермического восстановления железа в кольцевой печи при максимальной температуре протекает очень быстро: степень восстановления 90 % достигается за 3–7 мин. Выполнен расчет теплового и материального балансов процесса углестермического восстановления брикетов. Химический состав металлизированных брикетов приведен в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав металлизированных брикетов

Элементы, оксиды	Концентраты		
	куранахский	медведевский	гремяха-вырмеский
TiO ₂	55,67	52,57	51,30
Fe _{мет}	32,68	35,09	35,49
FeO	3,41	3,40	3,43
SiO ₂	1,95	3,50	3,19
Al ₂ O ₃	1,87	1,59	1,58
CaO	0,11	0,51	0,11
MgO	2,57	0,50	2,86
MnO	0,53	1,05	0,61
Cr ₂ O ₃	0,07	0,28	0,28
V ₂ O ₅	0,09	0,42	0,08
C	0,70	0,73	0,71

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что получение брикетов с высокой степенью металлизации в кольцевой печи возможно при реализации режима термообработки, обеспечивающего быстрый нагрев до температуры 1 400–1 500 °С. Цикл термообработки брикетов в кольцевой печи, в зависимости от состава ильменитового концентрата, может составлять 15–30 мин, включая стадии загрузки, нагрева, обжига, охлаждения и выгрузки.

При использовании горячих металлизированных брикетов в руднотермической плавке значительно сокращается продолжительность плавки и расход электроэнергии на производство титанового шлака. Если при выплавке титанового шлака из малышевского ильменитового концентрата по одностадийной схеме расход электроэнергии составляет 2 000 кВт·ч/т шлака, то использование куранахского, медведевского и гремяха-вырмеского ильменитовых концентратов приведет к увеличению расхода электроэнергии до 4 000–5 000 кВт·ч/т. Переход на двухстадийную схему с предварительным восстановлением в кольцевой печи позволит снизить расход электроэнергии при выплавке титанового шлака из медведевского ильменитового концентрата на 2 200–2 400 кВт·ч/т. Это позволит ильменитовым концентратам коренных месторождений конкурировать с ильменитами россыпных месторождений при производстве титанового шлака.

По двухстадийной схеме произведены расчеты теплового и материального балансов производства титанового шлака в руднотермической печи из ильменитовых концентратов Куранахского, Медведевского и Гремяха-Вырмеского месторождений. Химический состав титанового шлака и чугуна из разных ильменитовых концентратов приведен в табл. 3. Шлаки по содержанию оксида титана удовлетворяют техническим требованиям для переработки по хлорной технологии. Шлаки из куранахского и гремяха-вырмеского концентратов не удовлетворяют требованиям хлорной технологии по содержанию MgO.

Полученные из ильменитовых концентратов чугуны требуют дополнительной обработки по удалению серы и, возможно, фосфора. Сера в металл поступает преимущественно с антрацитом, а фосфор, вероятно, присутствует в концентрате Гремяха-Вырмес.

Заключение

Выполнены лабораторные исследования и расчеты процессов восстановления и плавки ильменитовых концентратов Куранахского, Медведевского и Гремяха-Вырмеского месторождений.

Предложена двухстадийная технологическая схема, включающая восстановление ильменито-угольных брикетов в кольцевой печи и плавку горячих металлизированных брикетов в руднотермической печи с получением титанового шлака и чугуна.

Таблица 3

Химический состав титанового шлака и металла из ильменитовых концентратов, %

Продукты плавки	Требования хлорной технологии, %	Ильменитовые концентраты		
		куранахский	медведевский	гремяха-вырмеский
Шлак				
TiO ₂	80–93	84,66	84,59	82,32
FeO	Не более 5,0	5,29	5,58	5,62
SiO ₂	Не более 4,0	1,81	3,45	3,13
Al ₂ O ₃	Не более 4,5	2,90	2,61	2,58
CaO	Не более 1,0	0,18	0,84	0,19
MgO	Не более 1,5	3,99	0,82	4,68
MnO	Не более 2,0	0,41	0,87	0,50
Cr ₂ O ₃	Не более 3,0	0,05	0,23	0,23
V ₂ O ₅	Не более 0,43	0,07	0,34	0,06
Выход шлака, %	—	66,7	63,3	63,3
Металл				
C		0,53	0,41	0,55
Ti		0,47	0,39	0,44
Mn		0,64	1,16	0,66
Si		0,72	0,85	0,68
Cr		0,07	0,27	0,27
V		0,07	0,32	0,06
Выход металла, %		33,3	36,7	36,7

В результате исследований установлено, что получение брикетов с высокой степенью металлизации в кольцевой печи возможно в результате термообработки при температуре 1 400–1 500 °С в течение 15–30 мин.

Переход на двухстадийную схему с предварительным восстановлением в кольцевой печи позволит снизить расход электроэнергии при выплавке титанового шлака из медведевского ильменитового концентрата на 2 200–2 400 кВт·ч/т.

Шлаки по содержанию оксида титана удовлетворяют техническим требованиям для переработки по хлорной технологии. Шлаки из куранахского и гремяха-вырмеского концентратов не удовлетворяют требованиям хлорной технологии по содержанию MgO.

Полученные из ильменитовых концентратов металлы требуют дополнительной обработки по удалению серы и, возможно, фосфора.

Список источников

1. Левицкий Д. В., Савицкий В. Н. Особенности российского рынка титана // Лакокрасочные материалы и их применение. 2004. № 7. С. 2–3.
2. Тигунов Л. П., Быховский Л. З., Зубков Л. Б. Титановые руды России: состояние и перспективы освоения. ФГУП ВИМС, М.: 2005. 104 с.
3. Смирнов Л. А., Тигунов Л. П., Масловский П. А. и др. Куранахское ильменит-титаномагнетитовое месторождение. Екатеринбург, УрО РАН. 2004. 310 с.
4. Кобелев В. А., Смирнов Л. А., Зуев А. Г., Прудской В. В. Комплексная переработки коллективного титаномагнетитового концентрата Медведевского месторождения // Новые технологии и материалы в металлургии. АО «Уральский институт металлов». Екатеринбург, 2015. С. 15–18.

5. Попов В. А., Серегин П. С., Цемехман Л. Ш., Барсегян В. В. Переработка титансодержащих концентратов месторождения Юго-Восточная Гремяха // Цветные металлы. 2009. № 9.
6. Гармата В. А., Петрунько А. Н., Галицкий Н. В., Олесов Ю. Г., Сандлер Р. А. Титан. М.: Metallurgy, 1983. 550 с.

References

1. Levitsky D. V., Savitsky V. N. Features of the Russian titanium market. *Paints and varnishes and their application*, 2004, No. 7, pp. 2–3. (In Russ.).
2. Tiginov L. P., Bykhovskiy L. Z., Zubkov L. B. *Titanium ores of Russia: status and development prospects*. FSUE VIMS. Moscow, 2005, 104 p. (In Russ.).
3. Smirnov L. A., Tiginov L. P., Maslovsky P. A. et al. *Kuranakhsкое ilmenite-titanomagnetite deposit*. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2004, 310 p. (In Russ.).
4. Kobelev V. A., Smirnov L. A., Zuev A. G., Prudskoy V. V. Integrated processing of collective titanomagnetite concentrate of the Medvedevskoye deposit. In the collection of scientific papers. *New technologies and materials in metallurgy*. JSC "Ural Institute of Metals". Ekaterinburg, 2015, pp. 15–18. (In Russ.).
5. Popov V. A., Seregin P. S., Tsemekhman L. Sh., Barseganyan V. V. Processing of titanium-containing concentrates of the Yugo-Vostochnaya Gremyakh deposit. *Non-ferrous metals*, 2009, No. 9. (In Russ.).
6. Garmata V. A., Petrunko A. N., Galitsky N. V., Olesov Yu. G., Sandler R. A. *Titan*. Moscow, Metallurgy, 1983, 550 p. (In Russ.).

Информация об авторах

В. А. Кобелев — кандидат технических наук, исполнительный директор НИЦ;
Г. А. Нечкин — кандидат технических наук, исполнительный директор НИЦ;
Л. А. Смирнов — академик РАН, научный руководитель.

Information about the authors

V. A. Kobelev — PhD (Engineering), Executive Director of the Research Center;
G. A. Nechkin — PhD (Engineering), Executive Director of the Research Center;
L. A. Smirnov — Academician of the Russian Academy of Sciences, Scientific Director for the Institute.

Статья поступила в редакцию 25.06.2025; одобрена после рецензирования 09.07.2025; принята к публикации 23.07.2025.
The article was submitted 25.06.2025; approved after reviewing 09.07.2025; accepted for publication 23.07.2025.