КОМПЛЕКСНОЕ РЕШЕНИЕ ВОПРОСОВ ГЛУБОКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ РУД*

С. В. КОРНИЛКОВ¹, д-р техн. наук, профессор, действительный член Академии горных наук, главный научный сотрудник; А. Н. ДМИТРИЕВ², д-р техн. наук, действительный член Российской академии естественных наук, действительный член Академии инженерных наук, главный научный сотрудник лаборатории пирометаллургии черных металлов, andrey.dmitriev@mail.ru;

А. Е. ПЕЛЕВИН³, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых

(¹ Институт горного дела Уральского отделения РАН, Россия, г. Екатеринбург;

² Институт металлургии Уральского отделения РАН, Россия, г. Екатеринбург;

³ Уральский государственный горный университет, Россия, г. Екатеринбург)

Аннотация. Предприятия уральского региона, имея значительные добывающие мощности, тем не менее завозят сырье, поэтому минимизация отходов — перспектива поддержания их сырьевой базы. Предложена технология повышения качества титаномагнетитового концентрата, которая заключается в разделении руды на два технологических сорта — “богатый” и “бедный” с последующим отдельным измельчением и обогащением этих сортов на отдельных секциях. По этой технологической схеме руда делится на легкообогащаемый и труднообогащаемый сорта не на стадиях технологической подготовки к отработке, добычи, транспортирования и дробления, а на стадии обогащения. Достоинством новой технологии является относительная простота модернизации производства, так как изменяется технологическая схема переработки руды только в цехе обогащения. В лабораторных условиях получен железованадиевый концентрат с содержанием железа 67,1 % и пентаоксида ванадия 0,6 %.

Ключевые слова: титаномагнетитовые руды, легко- и труднообогащаемые сорта руды, технологические схемы переработки руды, железованадиевый концентрат, коксо доменная и бескоксовая схемы переработки.

Ссылка для цитирования: Корнилков С.В., Дмитриев А.Н., Пелевин А.Е. Комплексное решение вопросов глубокой переработки титаномагнетитовых руд // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 1. С. 12–18.

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-1-12-18

COMPREHENSIVE SOLVING TASKS OF DEEP PROCESSING OF TITANIUM-MAGNETITE ORES

*S. V. KORNILKOV¹, HD (Tech.), Prof., actual member of Academy of mining, Chief Res. Ass.;
A. N. DMITRIEV², HD (Tech.), actual member of Russian Academy of Natural Sciences, actual member of Academy of Engineering Sciences of Russian Federation, Chief Res. Ass., Lab. “Pyrometallurgy of ferrous metals”,
andrey.dmitriev@mail.ru; A. E. PELEVIN³, HD (Tech.), Prof. Ass., Prof., Dpt. “Minerals concentration”*

(¹ Institute of Mining, Ural branch of RAN, Russia, Ekaterinburg;

² Institute of Metallurgy, Ural branch of RAN, Russia, Ekaterinburg;

³ Ural State Mining University, Russia, Ekaterinburg)

Abstract. Despite the plants of the Ural region have significant mining capacities, they are buying raw materials from other regions, therefore the task of wastes minimization is a perspective of supporting their raw materials base. A technology was proposed to increase the quality of titanium-magnetite concentrate, comprising dividing of the ore into two technological grades – a rich and a poor ones following separate crushing and concentration of the grades at separate sections. Due to this technological scheme, the ore is divided into easy-concentrated and hard-concentrated grades at the concentration stage, but not at the stages of preparation to development, mining, transporting and crushing. The advantage of the new technology is the relative simplicity of equipment moderni-

* Работа выполнена в рамках междисциплинарного проекта 18-5-2345-56 “Освоение недр Земли: обоснование методов рудоподготовки для глубокой комплексной переработки минерального сырья и повышения эффективности производства металлопродукции”.

zation, since the technological scheme of the ore processing is modified only at the concentration plant. Under laboratory conditions, an iron-vanadium concentrate with iron content of 67.1% and vanadium pentoxide of 0.6% was obtained.

Key words: titanium-magnetite ores, easy- and hard-concentrated ore grades, technological schemes of ore processing, iron-vanadium concentrate, coke-BF and coke-less schemes of processing.

For citation: Kornilov S.V., Dmitriev A.N., Pelevin A.E. Comprehensive solving tasks of deep processing of titanium-magnetite ores. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2020, vol. 76, no. 1, pp. 12–18. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-1-12-18

Уральский регион, имея значительные перерабатывающие и добывающие мощности, тем не менее завозит сырье, поэтому переработка отходов — перспектива поддержания сырьевой базы региона.

Как показали предыдущие исследования [1], помимо экономической эффективности проекта в качестве критериев для оценки конечного результата переработки техногенно-минеральных образований следует принять: существенное сокращение (ликвидацию) отходов, образовавшихся в процессе вторичной переработки техногенного сырья, с одновременным сохранением или снижением класса их опасности; наличие устойчивых потребителей и долгосрочной потребности в комплексных поставках продукции; возможность налаживания параллельно-последовательной рекультивации нарушенных земель; наличие инженерных мероприятий, предотвращающих распространение не только текущих, но и прогнозируемых загрязнений, возникающих при отработке техногенного объекта. При отборе инвестиционных предложений указанные признаки следует считать ведущими при выборе первоочередных объектов отработки.

С позиций обеспечения экологической безопасности горного производства следует стремиться к минимизации всех видов текущих отходов, предусматривая комплексное использование эксплуатируемых ресурсов. Однако даже наилучшие доступные технологии, используемые при добыче и переработке минерального сырья, тем не менее предусматривают образование значительного количества отходов, поэтому требуется предотвращение их негативного воздействия. Комплексными исследованиями технологий добычи и обогащения с выделением природных типов руд, а также глубокой металлургической переработки минерального и техногенного сырья установлено, что при организации переработки титаномагнетитового концентрата по схеме металлизация – электроплавка с последующей утилизацией высокотитанистых шлаков создается, в том числе и на Урале, новая сырьевая база горно-металлургического комплекса для комплексного извлечения железа, титана и ванадия пирометаллургическими методами.

Результаты обогащения проб минеральных разновидностей руды Гусевогорского месторождения показали отличия в обогатимости и из-

мельчаемости малотитанистой разновидности руды по сравнению с нормальнотитанистой разновидностью руды, поэтому целесообразно выделить их в разные технологические типы и добывать и перерабатывать отдельно. При этом суммарные технологические и экономические показатели раздельного обогащения природных типов руд будут выше показателей обогащения руды валовой добычи [2, 3]. Методика районирования технологических типов руд, основанная на геоинформационном моделировании, апробирована для условий Гусевогорского и Собственно-Качканарского месторождений титаномагнетитов. На рис. 1 представлены блок-схема последовательности технологических операций и систематизированные методы исследования минерально-сырьевой базы (МСБ) для оценки технической и технологической возможности добычи и обогащения руд.

Изучение горно-геологических условий формирования титаномагнетитовых руд и оценка их качественных характеристик с использованием методов геостатистики и блочного моделирования позволили создать информационную основу для обоснования способов рудоподготовки при комплексной переработке минерального сырья.

При оценке допустимости внедрения технологий металлизации железорудного сырья из руд Гусевогорского и Собственно-Качканарского месторождений сформулированы основные требования к производимому концентрату: общее содержание железа — не ниже 67 %; содержание кислотных оксидов ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$) — предпочтительно <2 %, допускается <3 %; содержание основных оксидов — допускается <3 % (поскольку они заменяют флюс в сталеплавильном производстве); содержание фосфора — <0,030 %; содержание серы — <0,008 %; содержание марганца — минимально возможное для уменьшения шлакообразования в электропечи; содержание щелочей (Na и K) — минимально возможное, так как они способствуют разрушению шихтовых материалов во время восстановления; цинк может присутствовать при переработке рециркулируемых материалов и является нежелательным для шахтных агрегатов элементом. Поэтому были выполнены технологические испытания руд Гусевогорского месторождения и районирование запасов, обеспечивающих при их переработке получение высокотитанистых и ванадиевых концентратов.

Рис. 1. Схема технологической оценки минерально-сырьевой базы

Fig. 1. Diagram of technological estimation of mineral raw materials base

Традиционные технологии повышения качества концентратов в России и за рубежом предполагают получение рядового концентрата и его доводку по отдельной технологии. Недостатками этих технологий являются: повышение энергоёмкости процесса (дополнительное измельчение, Лебединский ГОК); применение флотационных (неэкологических, Михайловский ГОК) технологий. Для титаномагнетитовой руды Качканарского ГОКа такие технологии не применимы, так как доводка рядового концентрата любыми методами увеличивает содержание железа в хвостах и общие потери железа при обогащении.

Новые схемы повышения качества производимых концентратов характеризуются прежде всего отдельной добычей в карьерах и отдельной переработкой на обогатительной фабрике природных типов руд. Такая технология возможна для условий Качканарского ГОКа, когда при добыче руды выделяются в отдельные потоки преимущественно высокованадиистые и низкотитанистые руды и преимущественно низкованадиистые и высокотитанистые руды, которые отдельно транспортируются на обогатительную фабрику. На обогатительной фабрике эти потоки перерабатываются на отдельных секциях. Технология переработки руд апробирована в лабораторных условиях на кафедре обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. По этой технологии получается рядовой концентрат (62 % Fe) и высококачественный концентрат для металлизации с содержанием железа 65 %. Возможность пирометаллургической переработки низко- и высокотитанистой разновидности руд показана в работах [4–6].

К недостаткам технологии следует отнести: необходимость изменения логистики доставки двух различных природных типов руды на обогатительную фабрику; сложность поддержания соотношений высокованадиистой и низкотитанистой руды и низкованадиистой и высокотитанистой руды на стадии планирования добычи руды, без чего обогатительная фабрика не сможет работать устойчиво; низкая доля высококачественного концентрата для металлизации в общем количестве концентрата, что приведет к сложности управления потоками концентратов на обогатительной фабрике; необходимость значительной модернизации цехов дробления и обогащения.

Основной принцип усовершенствованной технологии повышения качества концентрата заключается в разделении руды или промпродукта схемы обогащения на два технологических

сорта — “богатый” и “бедный”, с последующим отдельным измельчением и обогащением этих сортов на отдельных секциях. По такой технологической схеме руда делится на легко- и труднообогатимый сорта не на стадиях технологической подготовки к отработке, добычи, транспортирования и дробления, а на стадии обогащения.

Лабораторные исследования проб руды Гусевгорского месторождения показали стабильность получения концентрата по новой технологии с содержанием железа 65 % и более (65–66 %). В таблице приведены содержания Fe, TiO₂, V₂O₅ в концентратах, полученных в лабораторных условиях. Данные таблицы свидетельствуют о том, что имеется тенденция снижения содержания TiO₂ и увеличения содержания V₂O₅ в концентрате при повышении в нем содержания Fe.

СОДЕРЖАНИЕ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ, %

COMPOSITION OF TITANIUM-MAGNETITE CONCENTRATES, OBTAINED UNDER LABORATORY CONDITIONS, %

Fe	TiO ₂	V ₂ O ₅
62,5	2,77	0,57
62,8	2,67	0,54
61,7	2,67	0,51
65,5	2,74	0,60
65,7	2,73	0,56
66,2	2,49	0,55
67,1	2,54	0,60

Достоинствами модернизированной технологии являются: относительная простота модернизации производства, так как изменяется технологическая схема переработки руды только в цехе обогащения; концентрат для металлизации с содержанием железа 65 % получается на двух (четырех, шести) секциях в зависимости от требуемого его количества при неизменной системе подачи руды на все технологические секции цеха обогащения. Недостатками схемы переработки являются: необходимость стабилизации характеристик рудной шихты, поступающей на обогатительную фабрику (по соотношению долей отдельных карьеров и по содержанию железа); необходимость модернизации нескольких секций второй половины обогатительной фабрики, на которых будет производиться концентрат для металлизации.

Описанные схемы являются новыми для переработки железных руд. Необходимо проведение опытно-промышленных испытаний.

По предварительной оценке, при металлizaции качканарских окатышей с содержанием железа 63 % могут быть получены следующие результаты, %: 82,6 Fe_{общ}; 74,5 Fe_{мет}; степень металлizaции — 90,2; 3,05 TiO₂; 0,68 V₂O₅. При дообогащении концентрата до 65 % Fe степень восстановления окатышей может составить 95 %. Более предпочтительным представляется процесс XYL III. Средняя степень металлizaции опытных окатышей в шахтной печи Мидрекс достигла 92,8 % при содержании 78,8 % Fe_{общ}; 73,1 % Fe_{мет}; 1,95 % C; 0,78 % V₂O₅. Прочность на сжатие составила 40–45 кг/окатыш, прочность в барабане в среднем на удар (+5 мм) — 88,6 %, на истирание (–0,5 мм) — 1,3 %. Оптимальный

интервал температур металлizaции — 935–970 °C.

Содержание TiO₂ в шлаках после плавки титаномagnetитового сырья не превысит 30–40 %, поэтому его извлечение в товарный продукт (пигментный диоксид титана или титановую губку) экономически нецелесообразно. Имеет смысл только извлечение V₂O₅, и его повышение в сталеплавильных шлаках возможно за счет использования более богатых по ванадию титаномagnetитовых концентратов.

Таким образом, получение ванадия из текущих шлаков при производстве железа может быть осуществлено по коксодоменной и бескоксовой схемам (рис. 2).

Рис. 2. Схемы переработки титаномagnetитовых концентратов

Fig. 2. Diagrams of titanium-magnetite concentrates processing

Результаты лабораторных и расчетных с помощью математических моделей исследований приведены в работах [7–9].

Заключение

Предложена технология повышения качества титаномагнетитового концентрата, которая заключается в разделении руды или промпродукта схемы обогащения на два технологических сорта — “богатый” и “бедный”, с последующим раздельным измельчением и обогащением этих сортов на отдельных секциях. По такой технологической схеме руда делится на легко- и трудно-обогатимый сорта не на стадиях технологической подготовки к отработке, добычи, транспортирования и дробления, а на стадии обогащения. Достоинствами модернизированной технологии

является относительная простота модернизации производства, так как изменяется технологическая схема переработки руды только в цехе обогащения. В лабораторных условиях получен железованадиевый концентрат, содержащий 67,1 % Fe и 0,6 % V_2O_5 . Для сравнения: в железованадиевых концентратах Гусевгорского месторождения текущего производства для агломерации и окомкования массовая доля железа составила 60 и 63 % соответственно, пентаоксида ванадия — 0,55–0,6 % [10].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корнилов С.В., Антонинова Н.Ю., Рыбников П.А., Дмитриев А.Н. Технологическо-экологические аспекты переработки техногенно-минеральных образований горнорудных предприятий // Труды конгресса с междунар. участием “Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований”. — Екатеринбург: УрО РАН, 2017. С. 34–38.
2. Яковлев В.Л., Корнилов С.В., Соколов И.В. Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья / Под ред. чл.-корр. РАН В.Л. Яковлева. — Екатеринбург: УрО РАН, 2018. — 360 с.
3. Корнилов С.В., Глебов А.В., Пелевин А.Е., Дмитриев А.Н. Раздельная добыча титановых руд с выделением их технологических типов // Титан. 2017. № 4. С. 8–11.
4. Корнилов С.В., Дмитриев А.Н., Пелевин А.Е., Яковлев А.М. Раздельная переработка руд Гусевгорского месторождения // Горный журнал. 2016. № 5. С. 86–90.
5. Dmitriev A.N., Vitkina G.Yu., Petukhov R.V. etc. The Characteristic of Ores and Concentrates of the Open Society “EVRAZ KGOK” // Advanced Materials Research. 2013. V. 834–836. P. 364–369.
6. Дмитриев А.Н. Современное состояние, перспективы развития и освоения базы титаносодержащих руд Урала // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2015. № 12. С. 36–40.
7. Дмитриев А.Н., Петухов Р.В. Подготовка к доменной плавке титаномагнетитовых концентратов с различным содержанием диоксида титана // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 12. С. 27–29.
8. Дмитриев А.Н., Витькина Г.Ю., Петухов Р.В. и др. Оценка показателей доменной плавки титаномагнетитовых концентратов с различным содержанием диоксида титана // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. № 2. С. 154–165.
9. Dmitriev A.N., Petukhov R.V., Vitkina G.Yu., Vyaznikova E.A. Reduction Roasting of Titaniferous Ores // Defect and Diffusion Forum (New Perspectives on Mass and Thermal Transport in Engineering Materials). 2019. V. 391. P. 215–220.
10. ЕВРАЗ КГОК. Производство [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://rus.evraz.com/enterprise/iron-ore/evraz-kgok/production/> (Дата обращения 05.12.2019 г.).

Поступила 25 ноября 2019 г.

REFERENCES

1. Kornilov S.V., Antoninova N.Yu., Rybnikov P.A., Dmitriev A.N. *Tekhnologo-ekologicheskie aspekty pererabotki tekhnogenno-mineral'nykh obrazovaniy gornorudnykh predpriyatii* [Technological and ecological aspects of man-caused mineral formations of mining plants processing]. *Trudy kongressa s mezhdunar. uchastiem “Fundamental'nye issledovaniya i prikladnye razrabotki protsessov pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh obrazovaniy”* [Proceedings of the Congress with international participation “Fundamental research and applied development of processes for the processing and disposal of technogenic formations”]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2017, pp. 34–38. (In Russ.).
2. Yakovlev V.L., Kornilov S.V., Sokolov I.V. *Innovatsionnyi bazis strategii kompleksnogo osvoeniya resursov mineral'nogo syr'ya* [Innovation basis of strategy of comprehensive development of mineral raw materials resources]. Yakovlev V.L. ed. Ekaterinburg: UrO RAN, 2018, 360 p. (In Russ.).
3. Kornilov S.V., Glebov A.V., Pelevin A.E., Dmitriev A.N. Separate mining of titanium ores with separation of their technological types. *Titan*, 2017, no. 4, pp. 8–11. (In Russ.).
4. Kornilov S.V., Dmitriev A.N., Pelevin A.E., Yakovlev A.M. Separate processing of ores of Gusevogorskoye deposit. *Gornyi zhurnal*, 2016, no. 5, pp. 86–90. (In Russ.).
5. Dmitriev A.N., Vitkina G.Yu., Petukhov R.V. etc. The Characteristic of Ores and Concentrates of the Open Society “EVRAZ KGOK”. *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 834–836, pp. 364–369.

6. Dmitriev A.N. Present state, perspectives of development and mining of the Ural base of titanium-containing ores. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2015, no. 12, pp. 36–40. (In Russ.).
7. Dmitriev A.N., Petukhov R.V. Preparation to the BF smelting of titanium-magnetite concentrates with various content of titanium dioxide. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2017, no. 12, pp. 27–29. (In Russ.).
8. Dmitriev A.N., Vit'kina G.Yu., Petukhov R.V. etc. Estimation of indicators of BF smelting of titanium-magnetite concentrates with various content of titanium dioxide. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, no. 2, pp. 154–165. (In Russ.).
9. Dmitriev A.N., Petukhov R.V., Vitkina G.Yu., Vyaznikova E.A. Reduction Roasting of Titaniferous Ores. *Defect and Diffusion Forum (New Perspectives on Mass and Thermal Transport in Engineering Materials)*, 2019, vol. 391, pp. 215–220.
10. EVRAZ KGOK. *Proizvodstvo* [EVRAZ KGOK. Production]. Electronic resource. Available at URL: <http://rus.evraz.com/enterprise/iron-ore/evraz-kgok/production> (Accessed 05.12.2019). (In Russ.).

Received November 25, 2019