

Получение ильменитового концентрата из лежалых хвостов обогащения ильменит-титаномагнетитовых руд

Мушкетов А. А.^{1*}, Шигаева В. Н.¹, Пелевин А. Е.²

¹АО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, Россия

²Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: mushketov_a@umbr.ru

Реферат

Введение. В статье рассмотрен принципиальный вид традиционных схем обогащения ильменитовых руд. На примере ильменитовых и железных руд показаны примеры повышения показателей разделения схем обогащения ильменитовых и железных руд за счет разделения исходного материала на технологические сорта по крупности.

Методика проведения исследований. Для получения ильменитового концентрата из исследуемой пробы лежалых хвостов, содержащей сростки ильменита, без использования измельчения предложено предварительное разделение питания цикла по магнитным свойствам для получения ильменитового концентрата на легко- и труднообогатимые сорта при помощи барабанного магнитного сепаратора с сильным полем и высокоградиентного роторного магнитного сепаратора.

Результаты исследований и их обсуждение. При разделении исходного питания на сорта основная доля раскрытых зерен ильменита сконцентрировалась в легкообогатимом сорте – магнитном продукте барабанного сепаратора с сильным полем, который крупнее исходного питания операции. В магнитный продукт роторного магнитного сепаратора, являющийся труднообогатимым сортом, перешла оставшаяся часть раскрытых зерен ильменита и большая часть богатых и бедных сростков. Крупность магнитного продукта роторного магнитного сепаратора меньше крупности питания. Каждый сорт обогащен по отдельной схеме с учетом технологических особенностей их фракционных составов по крупности и диоксиду титана.

Выводы. Использование схемы, включающей барабанный магнитный сепаратор с сильным полем и высокоградиентный роторный магнитный сепаратор, позволило разделить ильменитсодержащие хвосты на легко- и труднообогатимые технологические сорта. Из легкообогатимого сорта возможно получение более богатого ильменитового концентрата по сравнению с концентратом из труднообогатимого. Разделение на технологические сорта позволяет сократить потери ильменита с хвостами при доводке промпродукта, полученного из труднообогатимого сорта, в цикле коронно-электростатической сепарации.

Ключевые слова: ильменит; технологические сорта; магнитная сепарация; сильное магнитное поле; потери диоксида титана; сростки ильменита; фракционные составы; разделение по крупности; цикл обогащения.

Введение. Переработка ильменитсодержащих руд в большинстве случаев происходит по следующей принципиальной схеме обогащения [1]. Первоначально производится мокрая магнитная сепарация в слабом поле с целью выделения в магнитный продукт сильномагнитных минералов (магнетит, титаномагнетит). Немагнитный продукт слабого поля подвергается магнитной сепарации в сильном поле с целью удаления породных минералов в хвосты. Магнитный продукт сепарации в сильном поле является ильменитовым промпродуктом, из которого

с помощью гравитационных [2, 3], электрических [4–6] или флотационных [7–9] методов получают ильменитовый концентрат. Сепарация в сильном магнитном поле осуществляется в высокоградиентных магнитных сепараторах с электромагнитными системами [10, 11]. Также возможно использование барабанных сепараторов с магнитными системами на основе постоянных магнитов из сплава Nd-Fe-B [12, 13].

Одним из способов повышения технологических показателей схем переработки ильменитсодержащих руд является предварительное разделение обогащаемого материала на труднообогатимый и легкообогатимый сорта с их последующим раздельным обогащением.

Предварительное разделение по крупности ильменитсодержащих хвостов мокрой магнитной сепарации позволяет получить более богатый по титану и легкообогатимый подрешетный продукт, из которого в дальнейшем будет получен ильменитовый концентрат. Надрешетный продукт будет более бедным по титану и его можно удалить в хвосты [14].

Разделение по крупности также используется при обогащении магнетитовых (титаномагнетитовых) руд с целью повышения качества железного концентрата [15].

Цель работы – исследовать возможность переработки ильменитсодержащих руд за счет их разделения на сорта по магнитным свойствам и последующего обогащения этих сортов по разным схемам.

Методика проведения исследований. Объектом исследований являлась проба лежалых хвостов обогащения ильменит-титаномагнетитовой руды Кусинского месторождения. Массовая доля железа и диоксида титана в пробе составила 20,17 и 7,66 %, соответственно. Из рудных минералов проба содержала 8 % титаномагнетита, 12 % ильменита и 1 % рутила. Из нерудных минералов в пробе присутствовали кварц, клинохлор, амфиболы и пироксены. Массовая доля клинохлора – 38 %. Суммарная массовая доля амфиболов и пироксенов – 38 %. По результатам фазового анализа: более 85 и 11 % всего титана пробы связано с ильменитом и рутилом, соответственно; более 26 и 24 % всего железа пробы было связано с титаномагнетитом и ильменитом, соответственно.

Результаты минералогического анализа показали, что в пробе 76 % ильменита находится в свободном состоянии. Количество сростков ильменита с титаномагнетитом составило 5 %. Остальная часть зерен ильменита представлена в виде сростков с зернами нерудных минералов и многокомпонентных сростков с суммарной массовой долей 19 %.

Методика технологических исследований лежалых хвостов обогащения ильменит-титаномагнетитовой руды Кусинского месторождения приведена на рис. 1.

Исследования проведены при текущей крупности пробы без использования дополнительных операций измельчения. Методика заключалась в первоначальном проведении мокрого магнитного обогащения в слабом магнитном поле в операциях ММС-I (1, 2) с целью выделения из исходной пробы сильномагнитной части и формирования объединенного немагнитного продукта для последующих технологических исследований в сильном магнитном поле.

Операция ММС-I (1) проведена в лабораторном барабанном магнитном сепараторе на постоянных магнитах ПБМ-II-42/15 при напряженности магнитного поля 1600 Э. Операция ММС-I (2) проведена в лабораторном барабанном электромагнитном сепараторе ЭБМ-32/20 производства ОАО «НПК Механобр-Техника» при напряженности магнитного поля 1300 Э. Немагнитный продукт слабомагнитного поля обогащен в операции ММС-II в лабораторном мокром барабанном маг-

нитном сепараторе с сильным магнитным полем ВИ МБС 400 × 250 производства НПО «Эрга» при напряженности магнитного поля на обечайке барабана сепаратора 8000 Э. Магнитная система сепаратора изготовлена из постоянных магнитов из сплава Nd-Fe-B. При обогащении в этом сепараторе получен магнитный продукт (промпродукт 1), который содержал основную массу ильменита, и немагнитный продукт, содержащий основную массу породных минералов и бедные сростки ильменита.

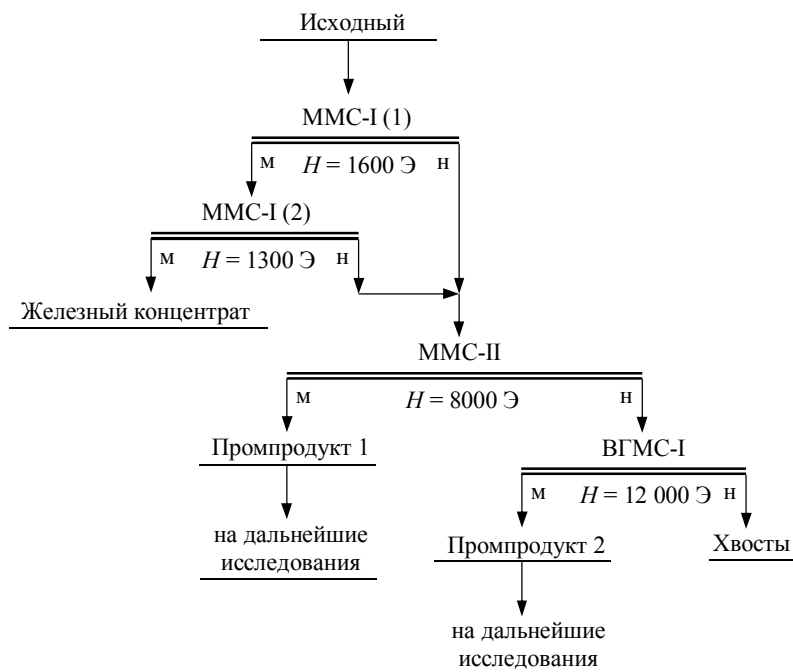


Рисунок 1. Лабораторная схема исследований: ММС – мокрая магнитная сепарация; м, н – магнитный и немагнитный продукт, соответственно; H – напряженность магнитного поля; ВГМС – высокоградиентная магнитная сепарация

Figure 1. Laboratory study flow diagram: ММС – wet magnetic separation; м, н – magnetic and non-magnetic product, respectively; H – magnetic field strength; ВГМС – high-gradient magnetic separation

Немагнитный продукт операции ММС-II являлся питанием операции ВГМС-I, которая была осуществлена в высокоградиентном роторном магнитном сепараторе ЭРЛ-7У производства ООО «Научно-технический центр магнитной сепарации МАГНИС ЛТД» при напряженности магнитного поля 12 000 Э. Магнитный продукт операции ВГМС-I являлся промпродуктом 2, немагнитный продукт – хвостами. Показатели обогатимости промпродуктов 1 и 2 были исследованы методами сухой магнитной сепарации, коронно-электростатической сепарации и разделения по крупности.

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты исследований, проведенных по схеме на рис. 1, представлены в табл. 1.

Результаты исследований показали, что из исходной пробы можно получить бедный железный концентрат с массовой долей железа и диоксида титана 56,6 и 6,60 %, соответственно, при выходе 10,23 %. Извлечение диоксида титана в железный концентрат составило 8,81 %. В немагнитном продукте массовая доля железа и диоксида титана составила 16,02 и 7,78 %, соответственно.

Результаты обогащения объединенного немагнитного продукта цикла ММС-I показали, что из него в операции ММС-II при напряженности магнитного поля 8000 Э можно выделить более 15 % от операции промпродукта 1 с массовой долей диоксида титана 29,16 %. При этом в магнитный продукт операции перешло 51,27 % всего диоксида титана исходной пробы. В немагнитном продукте ММС-II массовая доля диоксида титана составила 4,01 %. С этим продуктом связано 39,91 % от всего диоксида титана пробы. Немагнитный продукт операции ММС-II обогащен в операции ВГМС-I при напряженности магнитного поля 12 000 Э. В результате обогащения получено более 77 % от операции магнитного продукта с массовой долей диоксида титана 4,67 % и немагнитный продукт с массовой долей диоксида титана 1,73 %. В магнитный продукт операции извлеклось 36,02 % всего диоксида титана пробы. Потери диоксида титана с немагнитным продуктом (часть хвостов схемы) составили 3,89 %.

Таблица 1. Результаты мокрых магнитных separаций ММС-I и ММС-II и высокоградиентной магнитной separации ВГМС-I
Table 1. Results of wet magnetic separations ММС-I and ММС-II and high-gradient magnetic separation ВГМС-I

Продукт	Выход, %		Массовая доля, %			Извлечение, %	
	частный	общий	Fe	TiO ₂	Fe _{магн}	Fe	TiO ₂
<i>ММС-I (1, 2), H₁ = 1600 Э, H₂ = 1300 Э</i>							
Магнитный	10,23	10,23	56,60	6,60	48,50	28,70	8,81
Немагнитный	89,77	89,77	16,02	7,78	0,75	71,30	91,19
Исходный	100,00	100,00	20,17	7,66	5,63	100,00	100,00
<i>ММС-II, H = 8000 Э</i>							
Магнитный	15,01	13,47	28,09	29,16	1,80	18,76	51,27
Немагнитный	84,99	76,30	13,89	4,01	0,56	52,55	39,91
Исходный	100,00	89,77	16,02	7,78	0,75	71,30	91,19
<i>ВГМС-I, H = 12 000 Э</i>							
Магнитный	77,44	59,09	14,77	4,67	0,58	43,27	36,02
Немагнитный	22,56	17,22	10,87	1,73	0,49	9,28	3,89
Исходный	100,00	76,30	13,89	4,01	0,56	52,55	39,91

Результаты исследований показали, что сепараторы в операциях ММС-II и ВГМС-I разделяли материал не только по магнитным свойствам, но и по крупности. В операции ММС-II получен магнитный продукт (промпродукт 1), который крупнее питания операции. Средневзвешенные крупности питания операции ММС-II и ее магнитного и немагнитного продуктов составили 0,183, 0,189 и 0,182 мм, соответственно. Для операции ВГМС-I магнитный продукт, наоборот, тоньше питания операции. Средневзвешенные крупности питания операции ВГМС-I и ее магнитного и немагнитного продуктов составили 0,182, 0,160 и 0,257 мм, соответственно. По содержанию диоксида титана крупные и средние классы магнитного продукта операции ВГМС-I являются бедными и пригодны для удаления в хвосты при помощи разделения по крупности.

Результаты мокрого грохочения при размере квадратного отверстия 0,2 мм показали, что из магнитного продукта операции ВГМС-I можно выделить от операции 27,78 % надрешетного продукта с массовой долей диоксида титана 1,11 %. Потери диоксида титана с надрешетным продуктом от исходного питания схемы составили 2,37 %. Подрешетный продукт с массовой долей диоксида титана 6,04 %,

полученный из труднообогатимого сорта, содержал достаточно большое количество слабомагнитных породных минералов и сростков зерен ильменита. Чтобы удалить их в хвосты и получить ильменитовый концентрат, была проведена сухая магнитная сепарация в сильном поле в валковом магнитном сепараторе с нижней подачей питания при напряженности магнитного поля 4500 Э и последующие три приема коронно-электростатической сепарации (КЭС) магнитного продукта в операции КЭС-II (1–3).

Таблица 2. Показатели обогащения промпродуктов легкообогатимого и труднообогатимого сортов в циклах доводки
Table 2. Beneficiation indicators of middlings of easy and difficult sorts in finishing cycles

Продукт	Выход, %		Массовая доля, %		Распределение, %			
	частный	общий	Fe	TiO ₂	частное		общее	
					Fe	TiO ₂	Fe	TiO ₂
<i>Цикл обогащения легкообогатимого сорта</i>								
<i>КЭС-I (1–3)</i>								
Проводники	70,05	9,44	32,30	38,83	80,56	93,29	15,11	47,83
Непроводники	28,43	3,83	17,79	5,34	18,01	5,21	3,38	2,67
Итого	100,00	13,47	28,09	29,16	100,00	100,00	18,76	51,27
<i>СМС-I, H=1500 Э</i>								
Магнитный	25,00	2,36	24,00	13,56	18,58	8,73	2,81	4,18
Немагнитный	75,00	7,08	35,07	47,25	81,42	91,27	12,30	43,66
Итого	100,00	9,44	32,30	38,83	100,00	100,00	15,11	47,83
<i>Цикл обогащения труднообогатимого сорта</i>								
<i>СМС-II</i>								
Магнитный	78,38	33,45	15,70	6,10	85,05	79,16	26,04	26,64
Немагнитный	21,62	9,22	10,01	5,82	14,95	20,84	4,58	7,01
Итого	100,00	42,67	14,47	6,04	100,00	100,00	30,61	33,65
<i>КЭС-II (1–3)</i>								
Проводники	6,34	2,12	38,90	45,55	15,71	47,34	4,09	12,61
Непроводники	92,64	30,99	14,08	3,32	83,06	50,38	21,63	13,42
Итого	100,00	33,45	15,70	6,10	100,00	100,00	26,04	26,64

Магнитный продукт операции ММС-II с массовой долей диоксида титана 29,16 %, являющийся легкообогатимым сортом, также направлялся в цикл доводки, состоящий из трех приемов коронно-электростатической сепарации КЭС-I (1–3), для удаления основной массы зерен породных минералов и сростков ильменита и на последующую центробежную сухую магнитную сепарацию в слабом магнитном поле. Сухая магнитная сепарация необходима для удаления в магнитный продукт остатков зерен титаномагнетита и его сростков, которые как проводники перешли бы из питания электрической сепарации в проводниковую фракцию и снизили бы качество ильменитового концентрата.

Технологические показатели разделения в циклах обогащения легкообогатимого и труднообогатимого сортов приведены в табл. 2.

Результаты обогащения показали, что из легкообогатимого сорта был получен немагнитный продукт сухой магнитной сепарации в слабом поле, являющийся ильменитовым концентратом 1, с массовой долей диоксида титана 47,25 %

при выходе от питания схемы 7,08 %. Суммарные потери диоксида титана с хвостами цикла доводки легкообогатимого сорта (непроводники КЭС-I и магнитный сухой магнитной сепарации СМС-I) составили 6,85 %. Из труднообогатимого сорта получена проводниковая фракция с массовой долей диоксида титана 45,55 % при выходе от питания схемы 2,12 %. Суммарные потери диоксида титана с хвостами цикла доводки (немагнитный СМС-II и непроводники КЭС-II) промпродукта, полученного из труднообогатимого сорта, составили 20,43 %.

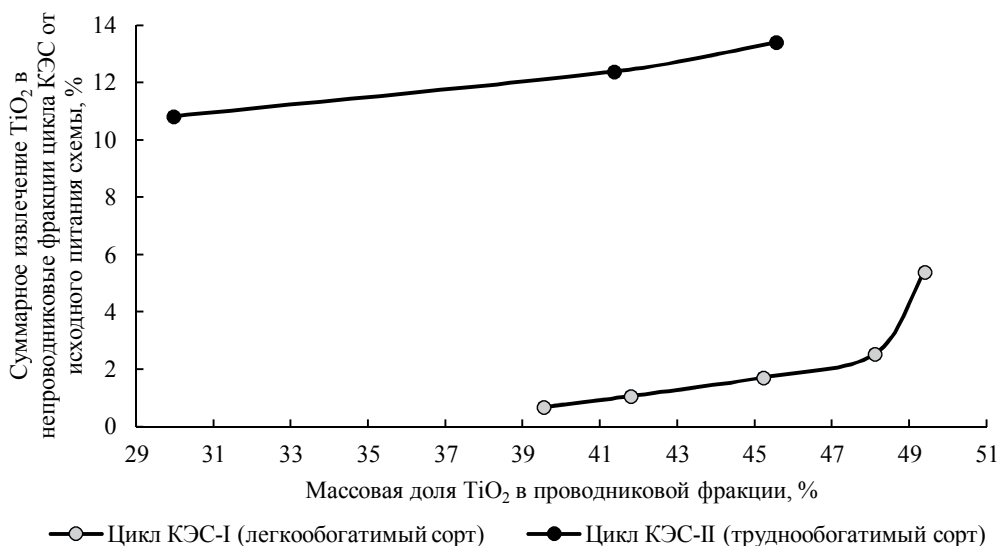


Рисунок 2. Зависимости суммарных потерь диоксида титана с непроводниковыми фракциями циклов коронно-электростатической сепарации КЭС-I и КЭС-II от массовой доли диоксида титана в проводниковой фракции

Figure 2. Dependences of total losses of titanium dioxide with non-conductive fractions of corona-electrostatic separation cycles КЭС-I and КЭС-II on the mass fraction of titanium dioxide in the conductive fraction

Для оценки обогатимости технологических сортов с точки зрения потерь ценного компонента с хвостами при достижении одного и того же качества концентрата было проведено сравнение зависимостей суммарных извлечений диоксида титана в непроводниковые фракции циклов КЭС-I и КЭС-II от массовой доли диоксида титана в проводниковых фракциях (ильменитовые концентраты) этих циклов. Обогащение в циклах заключалось в перечистных коронно-электростатических сепарациях проводниковых фракций. Количество приемов для цикла КЭС-I составило пять, для цикла КЭС-II – три. Для цикла КЭС-II питанием являлся магнитный продукт СМС-II, показатели обогащения которого приведены в табл. 2. Для цикла КЭС-I питанием являлся немагнитный продукт, полученный при сухой центробежной сепарации промпродукта 1 при напряженности магнитного поля 1500 Э с целью удаления из питания цикла зерен титаномагнетита и сростков в виде магнитного продукта. Результаты исследований приведены на рис. 2.

Анализ зависимостей показал, что из легкообогатимого сорта по сравнению с труднообогатимым в цикле коронно-электростатической сепарации возможно получение более богатого по диоксиду титана ильменитового концентрата (49,39 против 45,55 %). При получении из легкообогатимого и труднообогатимого сортов ильменитовых концентратов с одинаковой массовой долей диоксида титана в диапазоне от 39,53 до 45,55 % различия между потерями диоксида титана

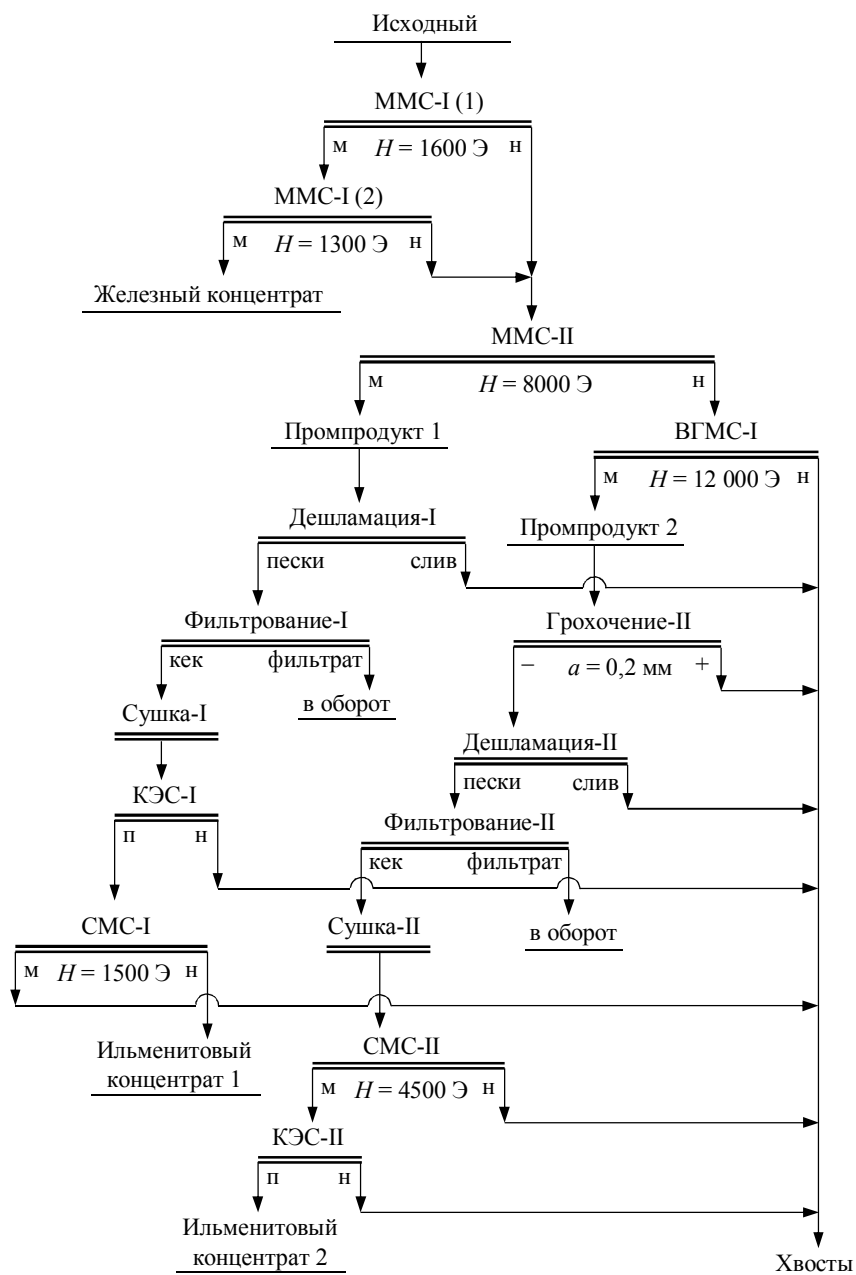


Рисунок 3. Принципиальный вид схемы переработки ильменитсодержащих хвостов с использованием разделения на технологические сорта: a – размер отверстия сита
 Figure 3. Line diagram of ilmenite-containing tailings processing using separation into technological sorts: a – screen size

с непроводниковыми фракциями (от питания всей схемы) циклов КЭС-II и КЭС-I изменяются в диапазоне от 11,30 (в 17,40 раза) до 11,52 % (в 7,08 раза).

Относительно высокие извлечения диоксида титана в непроводниковые фракции цикла КЭС-II являются следствием наличия в магнитном промпродукте, полученном из труднообогащаемого сорта, достаточно большого количества богатых ростков ильменита. Эти ростки имеют схожие с зёрнами ильменита удельные

магнитные и электрические свойства. Разделение исходного питания цикла получения ильменитового концентрата на технологические сорта позволило сократить потери диоксида титана при коронно-электростатических сепарациях за счет концентрации основной массы сростков ильменита в труднообогатимом сорте.

На рис. 3 приведен окончательный принципиальный вид технологической схемы переработки лежалых хвостов. Легкообогатимый сорт получается в операции ММС-II при помощи барабанного магнитного сепаратора с сильным полем, труднообогатимый сорт – в операции ВГМС-I при помощи высокоградиентного роторного магнитного сепаратора. Все технологические сорта обогащаются по разным схемам в соответствии с их технологическими особенностями с целью достижения максимальных технологических показателей всей схемы.

Таблица 3. Технологический баланс конечных продуктов обогащения
Table 3. Technological balance of final beneficiation products

Продукт	Выход, %	Массовая доля, %		Извлечение, %	
		Fe	TiO ₂	Fe	TiO ₂
<i>Баланс по конечным продуктам</i>					
Железный концентрат	10,23	56,60	6,60	28,70	8,81
Ильменитовый концентрат 1	7,08	35,07	47,25	12,30	43,66
Хвосты 1	6,39	20,36	9,12	6,45	7,62
Ильменитовый концентрат 2	2,12	38,90	45,55	4,09	12,61
Хвосты 2	56,97	13,87	3,15	39,18	23,41
Хвосты ВГМС-I	17,22	10,87	1,73	9,28	3,89
Итого	100,00	20,17	7,66	100,00	100,00
<i>Баланс по объединенным продуктам</i>					
Железный концентрат	10,23	56,60	6,60	28,70	8,81
Ильменитовый концентрат	9,20	35,95	46,86	16,39	56,27
Хвосты	80,58	13,74	3,32	54,91	34,92
Итого	100,00	20,17	7,66	100,00	100,00

В табл. 3 приведен технологический баланс обогащения ильменитсодержащих лежалых хвостов по схеме, приведенной на рис. 3. Технологический баланс показал, что потери диоксида титана с хвостами обогащения, полученными из легкообогатимого сорта (хвосты 1), составили 7,62 %. Аналогичный показатель для хвостов, полученных из труднообогатимого сорта (хвосты 2), составил 23,41 %. Суммарное извлечение диоксида титана в хвосты схемы обогащения составило 34,92 %.

Выводы. Использование схемы обогащения, включающей мокрые магнитные сепарации в барабанном сепараторе с сильным полем и в высокоградиентном роторном сепараторе, позволило произвести разделение ильменитсодержащих лежалых хвостов на технологические сорта – легкообогатимый и труднообогатимый.

Раздельное обогащение технологических сортов позволило получить из легкообогатимого сорта ильменитовый концентрат 1 с массовой долей диоксида титана 47,25 %, из труднообогатимого сорта – ильменитовый концентрат 2 с массовой долей диоксида титана 45,55 %. Для ильменитового концентрата 1 существует резерв по повышению качества до 49,39 % по массовой доле диоксида титана. Для ильменитового концентрата 2 массовая доля диоксида титана 45,55 % является максимальной. Потери диоксида титана с суммарными хвостами схемы обогащения составили 34,92 %.

Потери диоксида титана с непроводниковыми фракциями коронно-электростатической сепарации промпродукта труднообогащаемого сорта превышают аналогичные показатели коронно-электростатической сепарации промпродукта легкообогащаемого сорта в 7,08–17,40 раз при получении ильменитовых концентратов одинакового качества в диапазоне по массовой доле диоксида титана от 39,53 до 45,55 %, соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пелевин А. Е., Шигаева В. Н., Водовозов К. А. Совершенствование схем обогащения ильменит-титаномагнетитовых и гематит-магнетитовых руд // ГИАБ. 2023. № 2-1. С. 106–119. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_106
2. Lingguo Meng, Shuling Gao, Dezhou Wei, Baoyu Cui, Yanbai Shen, Zhenguo Song, Jun Yuan. Effects of cross-sectional geometry on flow characteristics in spiral separators // Separation Science and Technology. 2021. Vol. 56. Iss. 17. P. 2967–2977. DOI: 10.1080/01496395.2020.1853169
3. Thomas Romeijn, Michael Behrens, Gavin Paul, Dongbin Wei. Experimental analysis of water and slurry flows in gravity-driven helical mineral separators // Powder Technology. 2022. Vol. 405(1). No. 117538. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117538
4. Булатов К. В., Газалеева Г. И., Шихов Н. В., Назаренко Л. Н. Разработка схемы обогащения титан-циркониевых песков месторождения Шокаш, Северный Казахстан // Обогащение руд. 2023. № 6. С. 3–8. DOI: 10.17580/or.2023.06.01
5. Урванцев А. И., Шихов Н. В., Зайцев Г. В. Результаты исследований и практика обогащения минерального сырья электрической сепарацией // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2005. № 5. С. 37–51.
6. Yan X., Wang H., Peng Z., Hao J., Zhang G., Xie W., He Y. Triboelectric properties of ilmenite and quartz minerals and investigation of triboelectric separation of ilmenite ore // International Journal of Mining Science and Technology. 2018. Vol. 28. Iss. 2. P. 223–230. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.01.003
7. Yusheng Du, Qingyou Meng, Qingyou Meng, Zhitao Yuan, Zhe Liu, Xuan Zhao. New insights into the impact of acid surface pretreatment on the flotation of three classified ilmenites // Applied Surface Science. 2022. Vol. 599(1-2). No. 153945. DOI: 10.1016/j.apsusc.2022.153945
8. Yujie Hu, Guohua Ye, Qi Zuo Wei Xiao, Xuanxiong Kang, Xueyin Liang, Siqin Zhu. Activation of ilmenite flotation by sodium chlorite in the sodium oleate system // Separation and Purification Technology. 2023. Vol. 305. No. 122506. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.122506
9. Yusheng Du, Qingyou Meng, Zhitao Yuan, Bern Klein, Lixia Li, Jiwei Lu. Effect of acid surface pretreatment on the floatability difference between ilmenite and titanite pre-absorbed by flotation reagents // Applied Surface Science. 2023. Vol. 613. No. 156121. DOI: 10.1016/j.apsusc.2022.156121
10. Zhita Yuan, Xuan Zhao, Jiwei Lu, Hong Lv, Lixia Li. Innovative pre-concentration technology for recovering ultrafine ilmenite using superconducting high gradient magnetic separator // International Journal of Mining Science and Technology. 2021. Vol. 31. Iss. 5. P. 1043–1052. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.10.011
11. Fan Yi, Luzheng Chen, Jianwu Zeng. Combinatorial optimization of rotating matrix in centrifugal high gradient magnetic separation // Minerals Engineering. 2023. Vol. 202. Art. 108309. DOI: 10.1016/j.mineng.2023.108309
12. Пелевин А. Е. Повышение эффективности обогащения железорудного сырья путем применения сепарации в повышенном магнитном поле // Черные металлы. 2022. № 1. С. 31–36. DOI: 10.17580/chm.2022.01.04
13. Shuaiping Shen, Zhitao Yuan, Jiongtian Liu, Qingyou Meng, Haiqing Hao. Preconcentration of ultrafine ilmenite ore using a superconducting magnetic separator // Powder Technology. 2020. Vol. 360. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.09.074
14. Пелевин А. Е., Шигаева В. Н. Возможность получения ильменитового концентрата из отходов обогащения титаномагнетитовой руды // Обогащение руд. 2022. № 2. С. 46–52. DOI: 10.17580/or.2022.02.08
15. Немькин С. А., Копанев С. Н., Мезенцева Е. В., Окунев С. М. Производство железорудного концентрата с повышенной долей полезного компонента // Горный журнал. 2017. № 5. С. 27–31. DOI: 10.17580/gzh.2017.05.05

Поступила в редакцию 21 мая 2024 года

Сведения об авторах:

Мушкетов Антон Андреевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией обогащения руд черных металлов отдела рудоподготовки и специальных методов исследований АО «Уралмеханобр». E-mail: mushketov_a@umbr.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9542-6474>

Шигаева Варвара Николаевна – старший научный сотрудник лаборатории обогащения руд редких металлов и неметаллического сырья АО «Уралмеханобр». E-mail: shigaeva_vn@umbr.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2662-2030>

Пелевин Алексей Евгеньевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. E-mail: a-pelevin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6063-3932>

DOI: 10.21440/0536-1028-2024-5-36-46

Obtaining ilmenite concentrates from mature tailings of ilmenite-titanium magnetite ore

Anton A. Mushketov¹, Varvara N. Shigaeva¹, Aleksei E. Pelevin²

¹AO Uralmekhanobr, Ekaterinburg, Russia.

²Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. Traditional line diagrams of ilmenite beneficiation are considered. Through ilmenite and iron ores, the instances are examined of increasing the separation indicators of ilmenite and iron beneficiation schemes by separating the feed into sorts by size.

Methods of research. In order to obtain ilmenite concentrate from the studied sample of mature tailings that contains ilmenite aggregates, without grinding, it is proposed to preseparate the cycle feed to obtain ilmenite concentrate by magnetic properties. The feed is to be preliminarily separated into easy and difficult sorts using a drum magnetic separator with a strong field and a high-gradient rotor magnetic separator.

Research results and discussion. When separating the feed into sorts, the main share of released ilmenite grains was concentrated in the easy sort, i.e. in the magnetic product of the drum separator with a strong field, which is larger than the initial feed of the operation. The remaining part of released ilmenite grains and most of high-grade and low-grade aggregates was concentrated in the magnetic product of the rotary magnetic separator, which is a difficult sort. The size of the magnetic product of the rotary magnetic separator is smaller than the feed size. Each sort is enriched according to a separate scheme taking into account the technological features of their fractional compositions by size and titanium dioxide.

Conclusions. A scheme with a drum magnetic separator with a strong field and a high-gradient rotary magnetic separator allowed to separate ilmenite-containing tailings into easy and difficult technological sorts. It is possible to obtain a higher-grade ilmenite concentrate from the easy sort compared to the concentrate from the difficult sort. Separation into technological sorts allows reducing ilmenite losses with tailings during finishing of the middlings obtained from the difficult sort in the corona-electrostatic separation cycle.

Keywords: ilmenite; technological sorts; magnetic separation; strong magnetic field; titanium dioxide losses; ilmenite aggregates; fractional compositions; separation by size; beneficiation cycle.

REFERENCES

1. Pelevin A. E., Shigaeva V. N., Vodovozov K. A. Schemes of enrichment of ilmenite-titanomagnetite and hematite-magnetite ores. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2023; 2-1: 106–119. (In Russ.) Available from: doi: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_106
2. Lingguo Meng, Shuling Gao, Dezhou Wei, Baoyu Cui, Yanbai Shen, Zhenguo Song, Jun Yuan. Effects of cross-sectional geometry on flow characteristics in spiral separators. *Separation Science and Technology*. 2021; 56(17): 2967–2977. Available from: doi: 10.1080/01496395.2020.1853169
3. Thomas Romeijn, Michael Behrens, Gavin Paul, Dongbin Wei. Experimental analysis of water and slurry flows in gravity-driven helical mineral separators. *Powder Technology*. 2022; 405(1): 117538. Available from: doi: 10.1016/j.powtec.2022.117538
4. Bulatov K. V., Gazaleeva G. I., Shikhov N. V., Nazarenko L. N. Development of a beneficiation scheme for titanium-zirconium sands of the Shokash deposit, North Kazakhstan. *Obogashchenie rud = Mineral Processing*. 2023; 6: 3–8. (In Russ.) Available from: doi: 10.17580/or.2023.06.01

5. Urvantsev A. I., Shikhov N. V., Zaitsev G. V. Research results and mineral raw material beneficiation by electrical separation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2005; 5: 37–51. (In Russ.)

6. Yan X., Wang H., Peng Z., Hao J., Zhang G., Xie W., He Y. Triboelectric properties of ilmenite and quartz minerals and investigation of triboelectric separation of ilmenite ore. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018; 28(2): 223–230. Available from: doi: 10.1016/j.ijmst.2018.01.003

7. Yusheng Du, Qingyou Meng, Qingyou Meng, Zhitao Yuan, Zhe Liu, Xuan Zhao. New insights into the impact of acid surface pretreatment on the flotation of three classified ilmenites. *Applied Surface Science*. 2022; 599(1-2): 153945. Available from: doi: 10.1016/j.apsusc.2022.153945

8. Yujie Hu, Guohua Ye, Qi Zuo Wei Xiao, Xuanxiong Kang, Xueyin Liang, Siqin Zhu. Activation of ilmenite flotation by sodium chlorite in the sodium oleate system. *Separation and Purification Technology*. 2023; 305: 122506. Available from: doi: 10.1016/j.seppur.2022.122506

9. Yusheng Du, Qingyou Meng, Zhitao Yuan, Bern Klein, Lixia Li, Jiwei Lu. Effect of acid surface pretreatment on the floatability difference between ilmenite and titanite pre-absorbed by flotation reagents. *Applied Surface Science*. 2023; 613: 156121. Available from: doi: 10.1016/j.apsusc.2022.156121

10. Zhita Yuan, Xuan Zhao, Jiwei Lu, Hong Lv, Lixia Li. Innovative pre-concentration technology for recovering ultrafine ilmenite using superconducting high gradient magnetic separator. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2021; 31(5): 1043–1052. Available from: doi: 10.1016/j.ijmst.2021.10.011

11. Fan Yi, Luzheng Chen, Jianwu Zeng. Combinatorial optimization of rotating matrix in centrifugal high gradient magnetic separation. *Minerals Engineering*. 2023; 202: 108309. Available from: doi: 10.1016/j.mineng.2023.108309

12. Pelevin A. E. Increasing the efficiency of iron ore raw materials beneficiation by separation in an increased magnetic field. *Chernye metally = Ferrous Metals Journal*. 2022; 1: 31–36. (In Russ.) Available from: doi: 10.17580/chm.2022.01.04

13. Shuaiping Shen, Zhitao Yuan, Jiongtian Liu, Qingyou Meng, Haiqing Hao. Preconcentration of ultrafine ilmenite ore using a superconducting magnetic separator. *Powder Technology*. 2020; 360: 1–9. Available from: doi: 10.1016/j.powtec.2019.09.074

14. Pelevin A. E., Shigaeva V. N. The potential of obtaining ilmenite concentrate from titanomagnetite ore tailings. *Obogashchenie rud = Mineral Processing*. 2022; 2: 46–52. (In Russ.) Available from: doi: 10.17580/or.2022.02.08

15. Nemykin S. A., Kopanov S. N., Mezentseva E. V., Okunev S. M. Iron concentrate production with the increased content of useful component. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2017; 5: 27–31. (In Russ.) Available from: doi: 10.17580/gzh.2017.05.05

Received 21 May 2024

Information about the authors:

Anton A. Mushketov – PhD (Engineering), Deputy Head of Department of Ore Dressing and Special Methods of Investigation, OA Uralmekhanobr. E-mail: mushketov_A@umbr.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9542-6474>

Varvara N. Shigaeva – senior researcher, Laboratory of Rare Metal Ore and Non-Metallic Mineral Beneficiation, AO Uralmekhanobr. E-mail: shigaeva_vn@umbr.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2662-2030>

Aleksei E. Pelevin – DSc (Engineering), Associate Professor, professor of the Department of Mineral Processing, Ural State Mining University. E-mail: a-pelevin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6063-3932>

Для цитирования: Мушкетов А. А., Шигаева В. Н., Пелевин А. Е. Получение ильменитового концентрата из лежалых хвостов обогащения ильменит-титаномагнетитовых руд // Известия вузов. Горный журнал. 2024. № 5. С. 36–46. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-5-36-46

For citation: Mushketov A. A., Shigaeva V. N., Pelevin A. E. Obtaining ilmenite concentrates from mature tailings of ilmenite-titanium magnetite ore. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2024; 5: 36–46 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2024-5-36-46