

УДК 622.788.3-661.846

ПОЛУЧЕНИЕ БЕЗОБЖИГОВЫХ ОКАТЫШЕЙ ИЗ ОТХОДОВ ШАБРОВСКОГО ТАЛЬКОВОГО КОМБИНАТА*

Гуляков В.С., к.т.н., старший научный сотрудник
Вусихис А.С., к.т.н., старший научный сотрудник (vas58@mail.ru)
Петрова С.А., к.ф.-м.н., старший научный сотрудник

Институт металлургии УрО РАН
 (620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

Аннотация. Техногенные отходы являются побочным продуктом любого производства. В то же время они могут являться сырьем для получения полезных продуктов. В частности, отходы Шабровского талькового комбината могут быть использованы для получения магнезиальных флюсов. Они дисперсны, поэтому должны быть окомкованы. Для этого предложен способ получения безобжиговых окатышей. В качестве вяжущего использована смесь воды и торфа, подвергнутая обработке в гидроударной кавитационной установке. Полученный материал представляет собой коллоидную систему с размером частиц менее 10^{-4} м. Для измерения размеров частиц использован метод динамического светорассеяния. Для сравнения исследована аналогичная смесь воды и торфа, обработанная в планетарной мельнице. Анализ полученных данных показал, что в образце после обработки смеси в гидроударной кавитационной установке до 90 % объема занимают частицы микронных размеров. В образце, измельченном в планетарной мельнице, большая часть частиц характеризуется размерами в десятки и даже сотни микрон. Определение прочности безобжиговых окатышей на раздавливание выполнено путем сжатия в разрывной машине модели Р-0,5. Для этих целей использованы окатыши как непосредственно после окомкования, так и после сушки при 105 °С до влажности менее 1,5 %. При оптимальной доле вяжущих 15 – 20 % прочность сырых окатышей составила 15, а сухих – 90 Н. При доле вяжущего менее 15 % как сырые, так и высушенные окатыши обладали невысокой прочностью. При доле вяжущего более 20 % шихта обладала излишней пластичностью и слипаемостью, что приводило к образованию конгломератов из нескольких окатышей. Несмотря на то, что прочностные показатели безобжиговых окатышей ниже, чем у окатышей, используемых в доменном производстве, они достаточны для применения в сталеплавильных процессах.

Ключевые слова: отходы Шабровского талькового комбината, брейнерит, магнезиальные флюсы, кавитационная гидроударная установка, торф, вяжущие материалы, окатыши.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-3-201-207

Шабровский тальковый комбинат (ШТК) осуществляет переработку талькомагнезитовых руд одноименного месторождения, которое относится к крупнейшим, запасы талькового камня по категориям $A + B + C_1$ составляют 87,01 млн т, C_2 – 52,5 млн т [1]. В состав руд входят около 50 % талька, 40 % брейнерита и небольшие количества хлорита, магнетита и хромита. Переработку руд осуществляют путем обогащения, основанного на различии флотуемости талька и магнезита [2, 3].

Схема работы обогатительной фабрики представляет собой один технологический поток и включает в себя следующие операции:

- измельчение исходной руды в замкнутом цикле с классификацией;
- основную флотацию талька;
- три перечистки талькового концентрата;
- контрольную флотацию хвостов первой перечистой флотации;
- магнитную сепарацию концентрата третьей перечистой флотации.

В результате обогащения получают флотированный тальк, удовлетворяющий требованиям промышленности. Отвальные хвосты основной флотации в количестве до 40 % от руды, пошедшей в переработку, направляются в отвал. За годы работы комбината в шламохранилище площадью 60 га скопилось 2,5 млн т хвостов со средним минералогическим составом, %: 30 – 40 брейнерита; 45 – 55 талька; 5 – 10 хлорита; 2 – 3 доломита. По данным химического анализа отходы содержат, %: 30 – 35 MgO; 20 – 25 SiO₂; 2 – 7 FeO; 3 – 5 Fe₂O₃; 0 – 2 CaO; 0 – 1 Al₂O₃; 26 – 31 ппп. [4].

Техногенные отходы, накапливаясь в отвалах, шламохранилищах, свалках несут определенную экологическую опасность [5 – 7]. В то же время, образуя «техногенные месторождения», они являются одним из дополнительных источников сырья, из которого путем разработки и внедрения соответствующих технологий может быть получена полезная продукция [8 – 12].

В настоящее время в сталеплавильном производстве широкое распространение получают магнезиальные флюсы [13 – 17]. Целесообразность их применения обусловлена возможностью формирования по ходу плавки шлаков, насыщенных или близких к насыщению

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИМЕТ УрО РАН по теме №0396-2015-0081.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Урал-М».

оксидом магния, что препятствует растворению MgO футеровки и резко снижает скорость ее износа. В связи с этим, в качестве сырья для изготовления флюсов предложено использовать отходы обогащения ШТК. Однако отходы, кроме оксида магния, содержат большое количество оксида кремния, поэтому эффективнее использовать концентрат, состоящий из 80 % магнезиально-железистого карбоната (брейнерит) и 20 % рудных минералов, в числе которых магнетит и, в меньшей степени, гематит, полученный в результате гравитационного обогащения отходов [18]. Химический состав выделенного концентрата, %: 37,1 MgO; 1,2 SiO₂; 14,5 Fe_{общ}; 9,1 FeO; 10,1 Fe₂O₃; 0,3 CaO; 0,1 Al₂O₃; 39,8 ппп.

Поскольку крупность отходов менее 0,63 мм, использование их в исходном состоянии в качестве шлакообразующих смесей, применяемых в различных агрегатах сталеплавильного производства, невозможно вследствие выдувания из ванны. Для использования данных материалов в сталеплавильных процессах необходимо их окусковывать [19 – 21].

К способам окускования дисперсных материалов относят следующие: брикетирование – путем полусухого прессования, в том числе с использованием связующих; агломерация – посредством высокотемпературного спекания в агломерационных агрегатах; окатывание – путем окомкования.

Наиболее экономичными считаются способы получения безобжиговых окатышей, предусматривающие окатывание увлажненной шихты, изготовленной из окусковываемых материалов и вяжущих (связующих) веществ, с получением сырых окатышей и их упрочнение за счет сушки или водотепловой обработки. В качестве вяжущих используются различные материалы: сульфитно-спиртовая барда, цемент, каменноугольные пеки и смола, нефтяные битумы и эмульсии, комбинированные связующие, меласса, известь, жидкое стекло и др.

Авторами работы в качестве связующего предложена обработанная в кавитационной гидроударной установке [22] смесь воды и торфа.

Используемая установка (рис. 1) обеспечивает создание гетерогенной не расслаивающейся суспензии механохимическим методом за счет кавитационного гидроударного воздействия. Она состоит из корпуса с патрубками входа и выхода обрабатываемого материала, а так же статора и ротора, концентрично установленных в нем. Статор и ротор имеют форму усеченного конуса. Их боковые поверхности снабжены двумя кольцевыми выступами с радиальными пазами в вершинах, которые образуют, по меньшей мере, две последовательные зоны прерывания потока.

Устройство работает следующим образом. Смесь воды и торфа в соотношении 3:1 поступает через входной патрубок во внутреннюю полость, где взаимодействует с ротором и статором. В процессе обработки по-

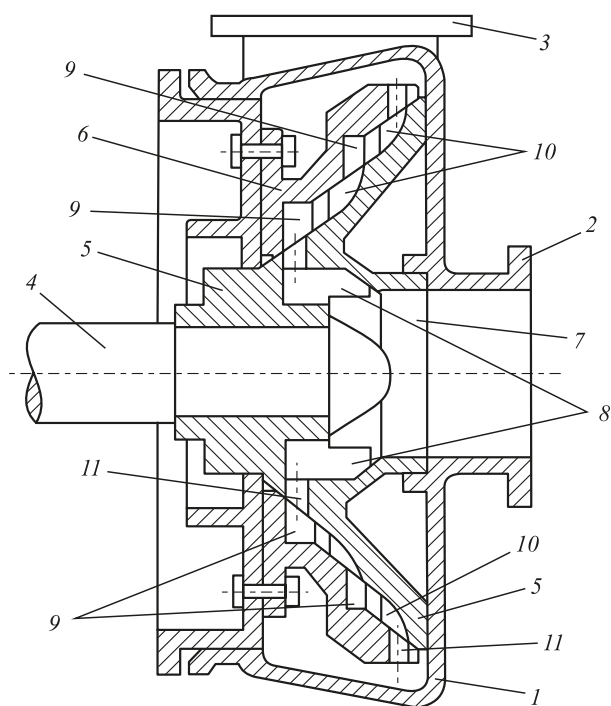


Рис. 1. Схема кавитационной гидроударной установки:
1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – выходной патрубок; 4 – вал;
5 – ротор; 6 – статор; 7 – внутренняя полость ротора; 8 – лопатки;
9 – радиальные пазы статора; 10 – радиальные пазы ротора;
11 – радиальные каналы ротора

Fig. 1. Scheme of a cavitation hydrostatic unit:
1 – body; 2 – inlet; 3 – outlet; 4 – shaft; 5 – rotor; 6 – stator; 7 – internal rotor cavity; 8 – vanes; 9 – radial grooves of the stator; 10 – radial grooves of the rotor; 11 – radial channels of the rotor

лучающийся продукт нагревается до температуры 80 – 90 °С. Конечный продукт поступает в накопительную емкость. Последующее охлаждение дезинтегрированной пульпы до комнатной температуры приводит к формированию органоминерального вяжущего, представляющего собой коллоидную систему.

Предварительно был проведен анализ размеров частиц полученного материала. Для сравнения исследован материал, полученный в результате измельчения смеси воды и торфа в соотношении 3:1 в планетарной мельнице.

Для измерения размеров частиц использовали метод динамического светорассеяния. При регистрации динамического светорассеяния измеряется флуктуация светорассеяния частиц, находящихся в состоянии броуновского движения, которое приводит к уширению спектра рассеянной световой волны. Полуширина рассеянного спектра Γ (постоянная затухания) пропорциональна коэффициенту диффузии:

$$\Gamma = Dq^2, \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии; q – величина вектора рассеяния ($q = 4\pi n \sin \frac{\theta}{2}$, где n – коэффициент пре-

ломления среды; λ – длина волны падающего света; θ – угол светорассеяния). Коэффициент диффузии в монодисперсной системе связан с гидродинамическим радиусом частиц R уравнением Стокса–Эйнштейна

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta R}, \quad (2)$$

где k_B – константа Больцмана; η – вязкость растворителя; T – температура. Одним из методов определения величины Γ является вычисление автокорреляционной функции интенсивности рассеянного света $g^{(1)}(\tau)$. Для монодисперсной среды $g^{(1)}(\tau)$ равно

$$g^{(1)}(\tau) = B \exp(-\Gamma\tau), \quad (3)$$

где B – это постоянная, зависящая от параметров прибора, таких как размер апертуры; Γ – постоянная затухания (полуширина рассеянного спектра). В случае броуновского движения смеси частиц (т. е. полидисперсного раствора) флуктуации интенсивности будут зависеть от коэффициентов диффузии частиц. Тогда автокорреляционная функция будет представлять собой сумму (интеграл) экспоненциальных членов с различными постоянными затухания:

$$q^{(1)}(\tau) = B \sum_i A_i \exp(-\Gamma_i \tau), \quad (4)$$

где A_i – относительная интенсивность света, рассеянного частицами с постоянной затухания Γ_i , которая пропорциональна коэффициенту диффузии частиц определенного размера и зависит от их относительного количества.

В ходе цикла измерения интенсивность рассеянного света регистрируется в виде последовательности данных о количестве световых импульсов за период отсчета Δt . Затем вычисляется корреляционная функция. Для обработки автокорреляционной функции применяют два способа: метод кумулянтов и метод регуляризации. При использовании первого для определения коэффи-

циентов K_m логарифм $g^{(1)}(\tau)$ аппроксимируется полиномом:

$$\ln(q^{(1)}(\tau)) = \sum K_m \frac{(-\tau)^m}{m!}. \quad (5)$$

Коэффициент первого порядка (или наклон $\ln(g^{(1)}(\tau))$) представляет собой усредненную постоянную затухания $\langle \Gamma \rangle$, зная которую, с помощью уравнений (1) и (2) можно вычислить усредненный коэффициент диффузии и диаметр частиц.

Коэффициент второго порядка, разделенный на квадрат $\langle \Gamma \rangle$, является показателем полидисперсности $\left(\frac{(\Gamma - \langle \Gamma \rangle)^2}{\langle \Gamma \rangle^2} \right)$. Для монодисперсных образцов значение

показателя полидисперсности, как правило, меньше 0,1. Для полидисперсных образцов его значение увеличивается. Определение вклада разных фракций в интенсивность рассеянного света и распределения частиц по размерам на основании установленной автокорреляционной функции проводилось методом Марквардта.

Образцы обработанного торфа для исследования распределения размеров частиц представляли собой коллоидную взвесь в воде.

Фазовый состав высушенных образцов определяли методом порошковой рентгеновской дифракции. Съемку проводили при комнатной температуре на дифрактометре D8 ADVANCE (Cu-K α излучение, 40 kV, 40 mA, параллельный пучок, позиционно-чувствительный детектор VANTEC-1, β -фильтр, подложка с нулевым фоном). Данные записывались в интервале углов $5 - 100^\circ$ с шагом $0,021^\circ$ по 2θ и экспозицией в точке от 1500 до 2000 с. Для анализа данных рентгеновской дифракции использовали программный пакет DIFFRAC^{plus}: EVA [23] и базу данных Международного центра дифракционных данных (ICDD) PDF4 [24].

Распределение частиц торфяной суспензии по размерам в зависимости от вида обработки представлено на рис. 2 и в таблице. Обе системы полидисперсные. Для наглядности также приведены данные объемного

Распределение частиц по размерам и относительный объем частиц каждого размера в торфяной суспензии, полученной в результате обработки (измельчения) в кавитаторе и в планетарной мельнице

Particle size distribution and relative volume of the particles of each size in the peat suspension obtained as a result of processing (grinding) in a cavitator and in a planetary mill

Кавитатор				Планетарная мельница			
Распределение частиц по размерам, нм	%	Объемное распределение, нм	%	Распределение частиц по размерам, нм	%	Объемное распределение, нм	%
438,7 ± 151,1	15	336,5 ± 90,8	2	375,3 ± 58,8	5	348,5 ± 54,5	1
8183,2 ± 6123,2	60	2265,6 ± 1282,8	90	3335,2 ± 823,5	19	2811,6 ± 654,2	1
35 139,6 ± 5069,7	12	31 377,2 ± 2833,1	6	73 625,7 ± 63 991,4	76	21 809,4 ± 11 349,4	98
65 908,1 ± 12 690,4	13	55 000,7 ± 12 004,3	2				
Показатель полидисперсности			0,750	Показатель полидисперсности			1,676

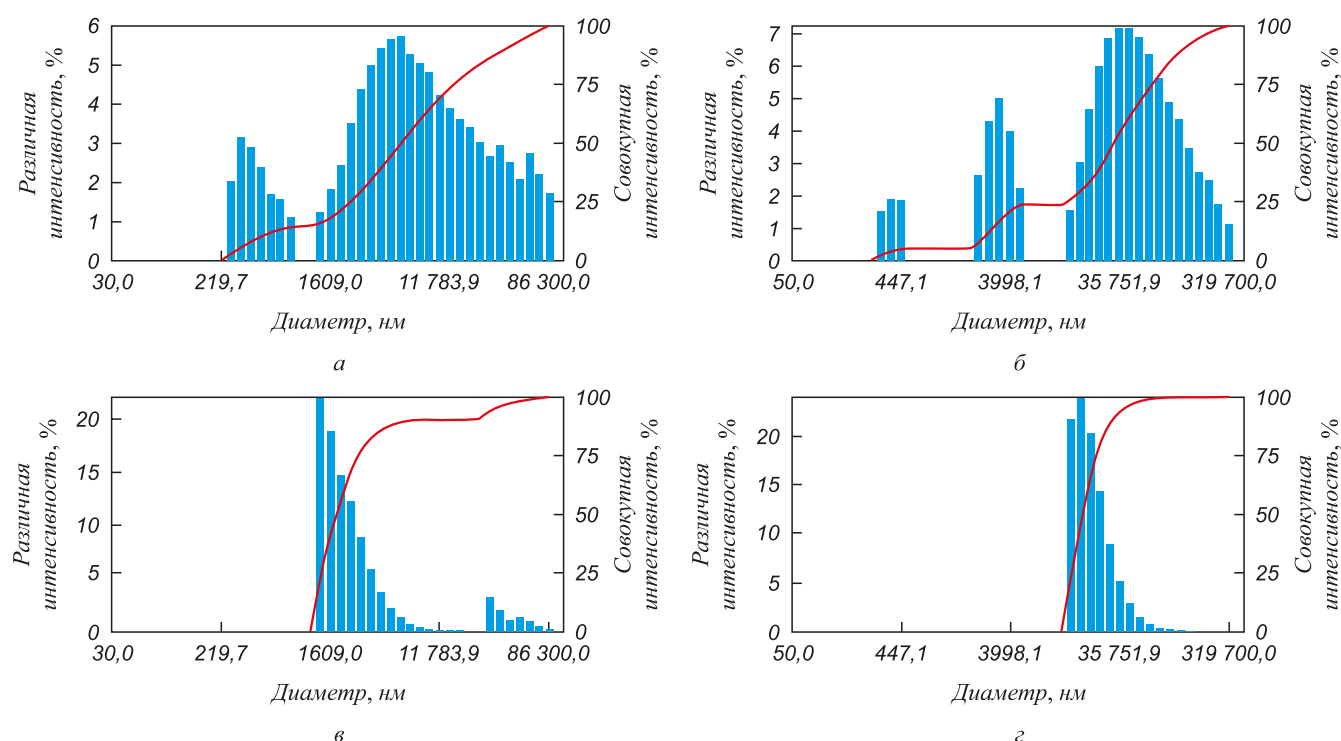


Рис. 2. Распределение частиц по размерам (а, б) и относительный объем частиц каждого размера (в, г) в торфяной суспензии, полученной в результате обработки (измельчения) в кавитаторе (а, в) и планетарной мельнице (б, г)

Fig. 2. The particle size distribution (а, б) and the relative volume of particles of each size (в, г) in the peat suspension obtained as a result of processing (grinding) in a cavitator (а, в) and in a planetary mill (б, г)

распределения частиц (относительный объем, занимаемый частицами каждого размера).

Согласно полученным данным (рис. 2, а, таблица), в образце после кавитационной обработки до 90 % объема занимают частицы микронных размеров, тогда как в образце, измельченном в планетарной мельнице (рис. 1, б, г, таблица), большая часть частиц характеризуется размерами в десятки и даже сотни микрон, т. е., по-видимому, такой способ измельчения приводит к частичной агрегации. При этом показатель поли-

дисперсности образца после обработки в планетарной мельнице возрастает более, чем в 2 раза. Кроме того, согласно данным рентгеновской дифракции (рис. 3), в процессе размала в мельнице в образце возможно возникновение химических реакций, приводящее к изменению его фазового состава.

На рис. 3 приведены дифрактограммы высушенных образцов торфа до и после двух видов обработки. Видно, что обработка в кавитаторе не приводит к существенным изменениям фазового состава, тогда как после

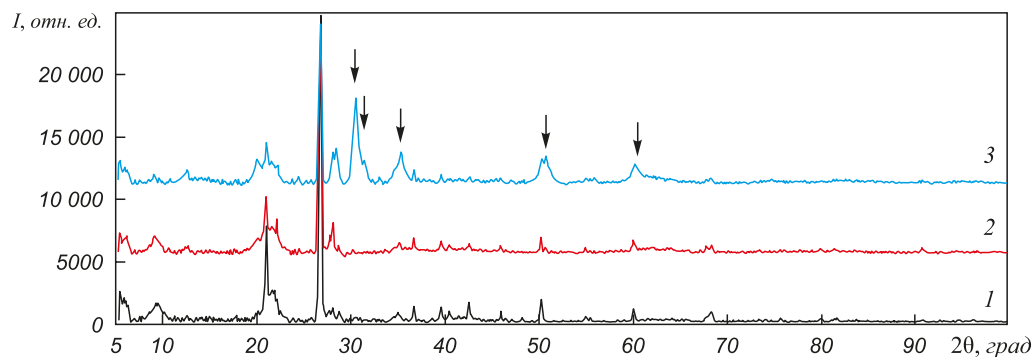


Рис. 3. Дифрактограммы высушенных образцов торфа:
1 – исходного; 2 – после кавитационной обработки; 3 – после размала в планетарной мельнице.
Стрелками показаны отражения от фазы, образовавшейся в процессе обработки

Fig. 3. Diffractograms of dried peat samples:
1 – initial; 2 – after cavitation treatment; 3 – after grinding in a planetary mill.
The arrows indicate reflections from the phase formed during processing

измельчения в мельнице на дифрактограмме появляются дополнительные линии (отражения от фазы, образовавшейся в процессе обработки, показаны стрелками). Это вполне объяснимо, если принять во внимание разогрев образца при размоле в высокоэнергетических мельницах типа АГО.

Смешение и первичное увлажнение шихты, состоящей из концентрата, полученного в результате гравитационного обогащения отходов ШТК, и органоминерального вяжущего проводили на барабанном смесителе в «водопадном» режиме движения шихты. Для ее окомкования использован тарельчатый гранулятор. Размер сырых окатышей 10 – 25 мм. Они должны обладать механической прочностью, достаточной для транспортировки без разрушения к сушильному агрегату и загрузке в него. Сухие окатыши должны выдерживать транспортировку к месту их использования. Схема получения окатышей представлена на рис. 4.

Определение прочности на раздавливание выполнено путем сжатия окатышей в разрывной машине модели Р-0,5. В каждой серии брали по 20 окатышей. В ходе опытов фиксировали усилие, необходимое для разрушения каждого окатыша и находили среднearифметическое значение. Сырые окатыши испытывали непосредственно после их получения в тарельчатом грануляторе, сухие – после сушки при температуре 105 °С до влажности менее 1,5 %.

Измеренная прочность сырых окатышей составила 15, сухих – 90 Н при содержании вяжущего в шихте 15 – 20 %. При доле вяжущего менее 15 % как сырые, так и обожженные окатыши имели невысокую прочность. При доле вяжущего более 20 % шихта обладала излиш-

ней пластичностью и слипаемостью, что приводило к образованию конгломератов из нескольких окатышей.

Выводы. Полученные результаты показывают, что прочностные показатели безобжиговых окатышей, изготовленных из отходов Шабровского талькового комбината путем их окомкования с 15 – 20 % вяжущего, ниже, чем у окатышей, используемых в доменном производстве, однако они достаточны для их применения в сталеплавильных процессах. К достоинствам полученных окатышей можно отнести тот факт, что при попадании в сталеплавильную ванну они разрушаются на мелкие агрегаты, что ускоряет их растворение в шлаке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Солодкий Н.Ф., Шамриков А.С., Погребенков В.М. Минерально-сырьевая база Урала для керамической, огнеупорной и стекольной промышленности: Справочное пособие / Под ред. Г.Н. Масленниковой. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 332 с.
2. Рагимов Р.А., Суглобов А.В. ОАО «Шабровский тальковый комбинат»: от истоков до наших дней // Горный журнал. 2007. № 1. С. 18 – 21.
3. Абрамов А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2004. Т. 2. – 510 с.
4. Хорошавин Л.Б., Рагимов Р.А., Пшеничникова З.И. Шабровские брейнеритовые концентраты // Новые огнеупоры. 2006. № 2. С. 20 – 22.
5. Юсфин Ю.С., Леонтьев Л.И., Черноусов П.И. Промышленность и окружающая среда. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 469 с.
6. Show K.-Y. Industrial Waste. Show K.-Y., Guo X. etc. In Tech, 2012. – 274 p.
7. Woodard F. Industrial Waste Treatment. Handbook. Butterworth-Heinemann, 2001. – 520 p.
8. Ситтинг М. Извлечение металлов и неорганических соединений из отходов: Справ. изд. / Пер с англ. / Под ред. Н.М. Эмануэля. – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.
9. Waste Treatment in the Metal Manufacturing, Forming, Coating and Finishing Industries / L.K. Wang, N.K. Shammas, Y.T. Hung etc. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL. 2009. – 494 p.
10. Industrial Waste Treatment Handbook. Second Edition. Elsevier Inc., 2006. – 581 p.
11. Леонтьев Л.И., Пономарев В.И., Шешуков О.Ю. Переработка и утилизация техногенных отходов металлургического производства // Экология и промышленность России. 2016. № 20(3). С. 24 – 27.
12. Rao S.R.R. Resource Recovery and Recycling from Metallurgical Wastes. Elsevier Science, 2006. – 557 p.
13. Дидковский В.К., Третьяков Е.В. Использование магниезных шлакообразующих материалов для повышения стойкости футеровки кислородных конвертеров. – М.: Черметинформация, 1985. – 23 с.
14. Высокомагнезиальные флюсы для сталеплавильного производства / К.Н. Демидов, Т.В. Борисова, А.П. Возчиков и др. – Екатеринбург: Уральский рабочий, 2013. – 280 с.
15. Демидов К.Н., Чумаков С.М., Зинченко С.Д. Использование ожезненного известково-магнезиального флюса в конвертерной плавке // Сталь. 2000. № 11. С. 46 – 48.
16. Бабенко А.А., Кривых Л.Ю., Левчук В.В. Влияние содержания оксида магния на рафинирующие свойства конвертерных шлаков // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 4. С. 20 – 23.
17. Румянцева Г.А., Немененок Б.М., Трибушевский В.Л., Горбель И.А. Магнезиальные флюсы и особенности их использования при плавке стали // Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск: БНТУ, 2016. Вып. 37. С. 31 – 37.

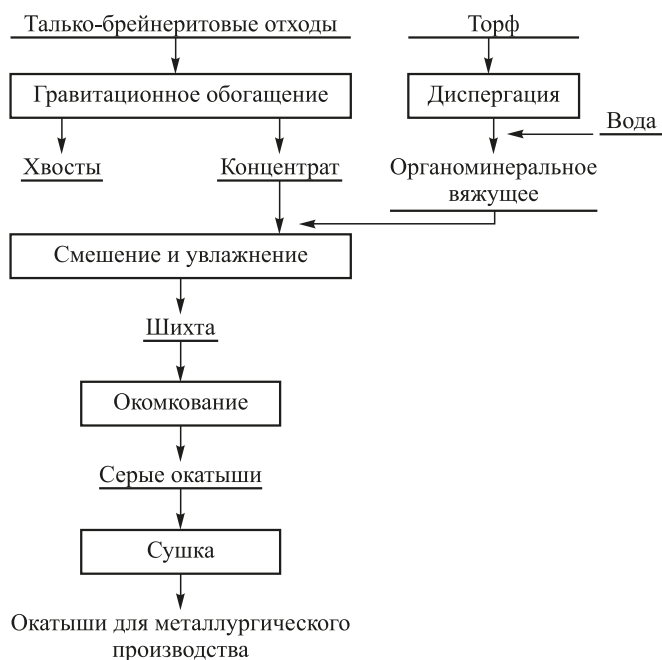


Рис. 4. Схема получения окатышей

Fig.4. Scheme of pellets production

18. Рябинин В.Ф., Вусихис А.С., Кудинов Д.З. Гравитационное разделение хвостов флотации талька // Обогащение руд. 2016. № 3. С. 52 – 56.
19. Wolfgang B. Pietsch. Agglomeration Process – phenomena, technologies, equipment. – Weinheim: Wiley, 2002. – 614 p.
20. Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability / Ed. Lu Liming. Woodhead Publishing, 2015. – 641 p.
21. Лотош В.Е. Безобжиговое окучивание тонкодисперсных материалов и мелочи полезных ископаемых. – Екатеринбург: ИД «Филантроп», 2009. – 525 с.

22. Пат. 2179066 РФ. Чиргин С.Г. Устройство для растворения, эмульгирования и диспергирования различных материалов; опубл. 10.02.2002, Бюл. № 4.
23. DIFFRACPlus: Eva Bruker AXS GmbH, Ostliche. Rheinbrückenstraße 50, D-76187, Karlsruhe, Germany. 2008.
24. Powder Diffraction File PDF4 + ICDD Release 2015.

Поступила в редакцию 25 апреля 2018 г.

После доработки 21 октября 2018 г.

Принята к публикации 29 января 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. Vol. 62. No. 3, pp. 201–207.

PRODUCTION OF NON-ROASTING PELLETS FROM THE WASTE OF SHABROVSKY TALCUM COMBINE

V.S. Gulyakov, A.S. Vusikhis, S.A. Petrova

Institute of Metallurgy, UB RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Technogenic wastes are by-products of any production. At the same time, they can be a raw material for obtaining useful products. In particular, the waste from the Shabrovsky talcum combine, can be used to produce magnesium fluxes. They are dispersed, so must be agglomerated. Therefore, a method has been proposed for the preparation of non-roasting pellets. As a binder, a mixture of water and peat, treated in a hydropercussion cavitation device, was used. The resulting material is a colloidal system with particle size of less than 10^{-4} m. To measure the particle size, dynamic light scattering method was used. For comparison, a similar mixture of water and peat treated in a planetary mill was studied. An analysis of the data obtained has shown that particles of micron size occupy up to 90 % of volume in the sample after treatment of the mixture in hydropercussion cavitation device. In a sample that was ground in a planetary mill, most of the particles are characterized by tens or even hundreds of microns. Determination of crushing strength of non-roasting pellets is performed by compressing in a tensile machine of model P-0.5. For this purpose, the granules were used both immediately after granulation and after drying at 105 °C to a moisture content of less than 1.5 %. With an optimum proportion of binders of 15 – 20 %, the strength of raw pellets was 15 N, and the strength of dry pellets was 90 N. With a binder percentage of less than 15 %, both raw and dried pellets had low strength. With a binder content of more than 20 %, the mixture had excessive plasticity and tackiness, which led to the formation of conglomerates of several granules. Despite the fact that the strength parameters of the non-roasting pellet are lower than those of pellets used in blast-furnace production, they are sufficient for use in steelmaking processes.

Keywords: waste, Shabrovsky talcum combine, breynerite, magnesian fluxes, hydropercussion cavitation device, peat, binding materials, pellets.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-3-201-207

REFERENCES

1. Solodkii N.F., Shamrikov A.S., Pogrebenkov V.M. *Mineral'no-syr'evaya baza Urals dlya keramicheskoi, ogneupornoj i stekol'noj promyshlennosti. Spravochnoe posobie* [Mineral and raw materials base of the Urals for ceramic, refractory and glass industry. Reference book]. Maslennikova G.N. ed. Tomsk: Izd-vo TPU, 2009, 332 p. (In Russ.).
2. Ragimov R.A., Suglobov A.V. OJSC "Shabrovsky talcum combine": from the sources up to now. *Gornyi zhurnal*. 2007, no. 1, pp. 18–21. (In Russ.).
3. Abramov A.A. *Pererabotka, obogashchenie i kompleksnoe ispol'zovanie tverdykh poleznykh iskopaemykh. T. 2* [Processing,

enrichment and integrated use of solid minerals: Vol. 2]. Moscow: Izd-vo Mosk. gos. gorn. un-ta, 2004, 510 p. (In Russ.).

4. Khoroshavin L.B., Ragimov R.A., Pshenichnikova Z.I. Shabrovsky breunnerite concentrates. *Novye ogneupory*. 2006, no. 2, pp. 20–22. (In Russ.).
5. Yusfin Yu.S., Leont'ev L.I., Chernousov P.I. *Promyshlennost' i okruzhayushchaya sreda* [Industry and environment]. Moscow: IKTs Akademkniga, 2002, 469 p. (In Russ.).
6. Show K.-Y. *Industrial Waste*. Show K.-Y., Guo X. eds. InTech, 2012, 274 p.
7. Woodard F. *Industrial Waste Treatment. Handbook*. Butterworth-Heinemann, 2001, 520 p.
8. Sittig Marshall. *Metal and Inorganic Waste Reclaiming Encyclopedia (Pollution Technology Review)*. Noyes Data Corporation, 1980, 591 p. (Russ.ed.: Sittig M. *Iz vlechenie metallov i neorganicheskikh soedinenii iz otkhodov. Sprav. izd.* Moscow: Metallurgiya, 1985, 408 p.).
9. *Waste Treatment in the Metal Manufacturing, Forming, Coating, and Finishing Industries*. Wang L.K., Shammass N.K., Hung Y.T. (eds.) CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, 2009, 494 p.
10. *Industrial Waste Treatment Handbook*. Second Edition. Elsevier Inc., 2006, 581 p.
11. Leont'ev L.I., Ponomarev V.I., Sheshukov O.Yu. Recycling and disposal of industrial waste from metallurgical production. *Ecology and Industry of Russia*. 2016, vol. 20, no. 3, pp. 24–27. (In Russ.).
12. Rao S.R.R. *Resource Recovery and Recycling from Metallurgical Wastes*. Elsevier Science, 2006, 557 p.
13. Didkovskii V.K., Tret'yakov E.V. *Ispol'zovanie magnezial'nykh shlakobrazuyushchikh materialov dlya povysheniya stoikosti futerovki kislorodnykh konverterov* [Use of magnesian slag-forming materials to increase the resistance of oxygen converters lining]. Moscow: Chernetinformatsiya, 1985, 23 p. (In Russ.).
14. Demidov K.N., Borisova T.V., Vozchikov A.P. etc. *Vysokomagnezial'nye flyusy dlya staleplavil'nogo proizvodstva* [High-Magnesia Fluxes for Steelmaking]. Ekaterinburg: Ural'skii rabochii, 2013, 280 p. (In Russ.).
15. Demidov K.N., Chumakov S.M., Zinchenko S.D. Use of ferruginous calc-magnesian flux in converter melting. *Stal'*. 2000, no. 11, pp. 46–48. (In Russ.).
16. Babenko A.A., Krivykh L.Yu., Levchuk V.V. Magnesia content influence on converter slags refining properties. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 4, pp. 20–23. (In Russ.).
17. Rummyantseva G.A., Nemenenok B.M., Tribushevskii V.L., Gorbil' I.A. Magnesia fluxes and features of their use in steel melting. In: *Metallurgiya: respublikanskii mezhdovedstvennyi sbornik nauchnykh trudov* [Metallurgy: Magnesia fluxes and features of their use in steel melting]. Issue 37. Minsk: BNTU, 2016, pp. 31–37. (In Russ.).
18. Ryabinin V.F., Vusikhis A.S., Kudinov D.Z. Investigation of the possibility of talcum flotation tailings gravity separation. *Obogashchenie rud*. 2016, no. 3, pp. 52–56. (In Russ.).

19. Wolfgang B. *Pietsch Agglomeration Process – phenomena, technologies, equipment*. Weinheim: Wiley, 2002, 614 p.
20. *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*. Lu Liming ed. Woodhead Publishing, 2015, 641 p.
21. Lotosh V.E. *Bezobzhigovoe okuskovanie tonkodispersnykh materialov i melochi poleznykh iskopaemykh* [Non-roasting agglomeration of finely dispersed materials and fines of minerals]. Ekaterinburg: ID “Filantrop”, 2009, 525 p. (In Russ.).
22. Chirgin S.G. *Ustroistvo dlya rastvoreniya, emul'girovaniya i dispergirovaniya razlichnykh materialov* [Device for dissolving, emulsifying and dispersing of various materials]. Patent RF no. 2179066, 104721. *Byulleten' izobretenii*. 2002, no. 4. (In Russ.).
23. *DIFFRACPlus*: Eva Bruker AXS GmbH, Ostliche. Rheinbruckenstraße 50, D-76187, Karlsruhe, Germany. 2008.
24. *Powder Diffraction File PDF4 + ICDD Release 2015*.

Funding. The work was performed as part of the state assignment of IMET of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences on the subject No. 0396-2015-0081.

Acknowledgements. The work was performed using the equipment of the Ural-M CUC.

Information about the authors:

V.S. Gulyakov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher

A.S. Vusikhis, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher
(vas58@mail.ru)

S.A. Petrova, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher

Received April 25, 2018

Revised November 21, 2018

Accepted January 29, 2019