

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

METALLURGY OF FERROUS, NON-FERROUS AND RARE METALS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 549.54.055

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-2-13-21



ИЗУЧЕНИЕ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА ШЛАКОВ ПРОИЗВОДСТВА ВАНАДИЕВОГО ЧУГУНА АЛАПАЕВСКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА

Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Леонова Л.В.

Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): Уральский регион уже более 300 лет является металлургическим центром России, и со столом продолжительный временной период здесь накопилось большое количество техногенных отходов (шлаков). Изучение вещественного состава шлаков является актуальной задачей, т.к. прежде чем их утилизировать, надо понять с каким минеральным составом мы имеем дело. Многие шлаки представляют собой потенциальную руду, которую можно дополнительно переработать, некоторые из них являются техногенными оgneупорами и т.д. Нами исследованы шлаки первой стадии получения феррованадия, когда в результате доменной плавки ванадийсодержащего титаномагнетитового концентрата образуется ванадиевый чугун, из которого уже потом по сложной цепочке и производят феррованадий. **Цель работы:** изучение вещественного (минерального) состава шлаков Алапаевского металлургического завода, полученных при производстве феррованадия. **Используемые методы:** химический состав породообразующих и рудных минералов установлен с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6390LV фирмы Jeol с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (ИГТ УрО РАН, г. Екатеринбург). Для анализа использовались полированные петрографические шлифы, вырезанные из кусочков шлака. **Новизна:** изучение вещественного состава шлаков проводилось с точки зрения классической минералогии и с использованием современной обязательной номенклатуры Международной минералогической ассоциации. **Результат:** впервые изучена минералогия шлаков феррованадиевого производства Алапаевского металлургического завода. Установлено, что они сложены акерманит-мервинитовым агрегатом с значительным содержанием шпинели и первовскита, а также постоянным присутствием шариков чугуна и хамбраевита. Данные шлаки являются отходами ферросплавного производства, а точнее, первичной стадией получения феррованадия, когда в результате доменной плавки ванадийсодержащего титаномагнетитового концентрата образуется ванадиевый чугун, из которого уже потом по сложной цепочке и производят феррованадий. Температура образования данных шлаков определена по содержанию глиноземистой молекулы геленита в матрице акерманита, она оценивается в пределах 1400–1390°C. **Практическая значимость:** Изученные нами шлаки можно пускать в дополнительную переработку, т.к. они содержат ванадиевый чугун и первовскит. Кроме того, шпинель и хамбраевит, как твердые минералы, могут быть выделены на абразивы.

Ключевые слова: акерманит, мервинит, шпинель, первовскит, минералогия, шлаки, Алапаевский металлургический завод.

© Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Леонова Л.В., 2020

Для цитирования

Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Леонова Л.В. Изучение вещественного состава шлаков производства ванадиевого чугуна Алапаевского металлургического завода // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №2. С. 13–21. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-2-13-21>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

MATERIAL COMPOSITION OF VANADIUM SLAGS AT THE ALAPAYEVSK METALLURGICAL PLANT

Yury V. Erokhin, Anatoly V. Zakharov, Lyubov V. Leonova

Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russia

Abstract. **Problem Statement (Relevance):** The Ural region has been a metallurgical center of Russia for over 300 years, and for such a long period a large amount of man-made waste (slag) has accumulated in this region. The study of the material composition of slags is currently important, since you need to understand what kind of a mineral composition we are dealing with before disposing them. Many slags are potential ores that can be further processed; some of them are technology-related refractories, etc. **Objectives:** The study of the material (mineral) composition of slags formed when producing ferrovanadium at the Alapayevsk Metallurgical Plant. **Methods Applied:** The chemical composition of rock-forming and ore minerals is identified using a JSM-6390LV Scanning Electron Microscope by Jeol, including INCA Energy 450 X-Max 80, the energy dispersive attachment by Oxford Instruments (the Institute of Geology and Geochemistry, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg). To analyze the composition, the authors used polished petrographic thin sections cut from pieces of slag. **Originality:** A material composition of the slags was studied from a point of view of classical mineralogy and using the modern mandatory nomenclature of the International Mineralogical Association. **Findings:** For the first time, mineralogy of ferrovanadium slags from the Alapayevsk Metallurgical Plant was studied. It has been established that they are composed of an akermanite-mervinitite aggregate with a significant content of spinel and perovskite, as well as the constant presence of balls of cast iron and khamrabaevite. These slags are wastes of ferroalloy production, or rather, the primary stage of producing ferrovanadium, when vanadium cast iron is formed as a result of blast furnace smelting of vanadium-containing titanomagnetite concentrate; vanadium cast iron is used to produce ferrovanadium through a complex chain. The slag formation temperature is determined by the content of the aluminous gehlenite molecule in the akermanite matrix and estimated at 1400–1390°C. **Practical Relevance:** The slags under our study can be recycled, as they contain vanadium cast iron and perovskite. In addition, spinel and khamrabaevite, like solid minerals, can be extracted by abrasives.

Keywords: akermanite, mervinitite, spinel, perovskite, mineralogy, slags, the Alapayevsk Metallurgical Plant.

For citation

Erokhin Yu.V., Zakharov A.V., Leonova L.V. Material Composition of Vanadium Slags at the Alapayevsk Metallurgical Plant. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 2, pp. 13–21. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-2-13-21>

Введение

Алапаевский металлургический завод является одним из старейших предприятий Среднего Урала. В 1696 г. в районе деревни Алапаиха, основанной в 1639 г. на одноименной реке близ места её впадения в реку Нейва, были найдены богатые железные руды. В 1702 г. по указу царя Петра I на берегу реки Алапаиха началось строительство казенного железоделательного завода, который уже в 1704 г. выдал первую продукцию. В 1725 г. завод производил 820 т чугуна и 167 т железа в год. При этом заводской пруд на р. Алапаиха был мелким, и завод полноценно работал только весной, поэтому в 1825 г. завод был перенесен на 1 км южнее, на более половодную реку Нейва. Алапаевский завод активно развивался весь XIX век, превратившись в металлургического гиганта, и хорошо работал до револю-

ционных волнений, когда в период 1905–1907 гг. предприятие понесло крупные убытки. Вплоть до 1917 года завод был убыточным. После Октябрьской революции предприятие было национализировано и в годы Гражданской войны работало с перебоями. На нормальный график производства оно вышло только с 1925 года. В годы Великой Отечественной войны Алапаевский завод был модернизирован за счет эвакуированных предприятий с запада страны. В послевоенный период завод активно работал и в основном занимался выплавкой чугуна и ферромарганца. С развалом СССР он стал приходить в упадок, со временем предприятие уменьшило производство чугуна и всё больше занималось ферросплавами (в основном ферромарганцем). В 1999 г. завод был преобразован в «Алапаевскую ферросплавную компанию», но с каждым годом выплавка ферромарганца уменьшалась, т.к. ос-

новные поставщики марганцевой руды находились за границей. С 2004 г. завод восстановил производство чугуна как основной продукции, но вошел в бесконечную череду банкротств. К сожалению, в 2018 г. Алапаевский завод окончательно прекратил работу и сейчас происходит разборка строений [1, 2].

Удивительно, но за более чем 300-летнюю историю завода никаких детальных исследований по вещественному составу шлаков так и не проводилось.

Отбор образцов шлака и методы исследования

Шлаки Алапаевского завода являются основным техногенным мусором в окрестностях города, практически вся западная и восточная окраины, а также центральная часть населенного пункта заняты отвальными массами предприятия. Кроме того, шлаками завода отсыпаны почти все дороги в районе самого г. Алапаевска, а также всех окружающих деревень и садовых территорий.

Отбор проб осуществлен из отвала с западной окраины города (привязка с GPS-навигатора – N 57°85'99.3", E 061°66'70.6"), куда идет узкоколейка со стороны металлургического завода, т.е. здесь отваливали шлаки современного ферросплавного производства. Площадь отвала составляет около 2 км², высота достигает 30 м. На данный момент отвал охраняется и потихоньку разбирается с применением техники. Нами были собраны образцы шлака темно-серого цвета с синеватым оттенком, тонко-мелкозернистые, с содержанием пор до 20–30% и редкими шариками белого металла. Эти шлаки и были нами изучены на предмет минерального состава.

Химический состав пордообразующих и рудных минералов определен с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6390LV фирмы Jeol с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (ИГГ УроСАН, г. Екатеринбург, аналитик Л. В. Леонова). Для анализа использовались полированые петрографические шлифы, вырезанные из кусочков шлаков.

Полученные результаты и их обсуждение

В результате исследований оказалось, что отобранные нами шлаки сложены акерманит-мервинитовым агрегатом со значительным содержанием шпинели и первовскита, а также постоянным присутствием шариков чугуна и Ti-V-карбида. Химический состав шлака следующий (в мас. %): SO₃ – 0,08; V₂O₃ – 0,25; SiO₂ – 25,68;

TiO₂ – 4,48; Al₂O₃ – 20,29; FeO_{общ} – 1,14; MgO – 12,03; MnO – 0,79; CaO – 35,26 (получен методом сканирования с поверхности всего полированного шлифа).

Акерманит ($\text{Ca}_2\text{Mg}[\text{Si}_2\text{O}_7]$) является одним из главных пордообразующих минералов шлака, и его содержание варьирует в пределах 40–50 об.% породы (рис. 1, 2).

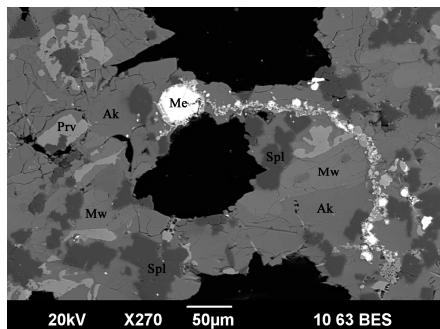


Рис. 1. Общий вид шлака Алапаевского завода; акерманит (Ak), мервинит (Mw), шпинель (Spl), первовскит (Prv) и чугун (Me). BSE-изображение, СЭМ JSM-6390LV

Fig. 1. General form of slag from the Alapayevsk Metallurgical Plant; akermanite (Ak), merwinite (Mw), spinel (Spl), perovskite (Prv) and cast iron (Me). BSE image, SEM JSM-6390LV

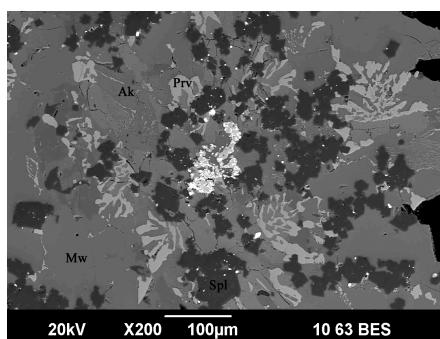


Рис. 2. Агрегат акерманита (Ak), мервинита (Mw), шпинели (Spl) и первовскита (Prv) в матрице шлака. BSE-изображение, СЭМ JSM-6390LV

Fig. 2. Aggregate of akermanite (Ak), merwinite (Mw), spinel (Spl) and perovskite (Prv) in a slag matrix. BSE image, SEM JSM-6390LV

Он слагает сплошной агрегат короткопрismaticических индивидов, с размером отдельных

кристаллов до 0,3 мм. Минерал имеет устойчивый химический состав и вполне уверенно определяется как глиноземистый акерманит (**табл. 1**). Из примесей устанавливаются Al_2O_3 (в пределах 9–11 мас.%) и TiO_2 (до 0,6 мас.%). Интересно, что минерал абсолютно не содержит железо, хотя природные соединения всегда ощутимо железистые. В природе акерманит встречается относительно часто в высокотемпературных известковистых скарнах [3], пирометаморфических комплексах [4] и углистых хондритах [5]. Является важным минералом доменных шлаков различного производства [6 и др.].

Мервинит ($\text{Ca}_2\text{Mg}[\text{SiO}_4]_2$) является вторым по значимости породообразующим минералом в шлаке, его содержание оценивается в пределах 25 об.% породы (см. **рис. 1, 2**). Он слагает отдельные короткопризматические индивиды, размером до 0,3–0,4 мм по удлинению, в агрегате зерен акерманита. По данным микрозондового анализа эти индивиды определяются как мервинит (**табл. 2**). Химический состав минерала очень близок к теоретическому и содержит небольшую примесь TiO_2 (до 0,8 мас.%). В природе мервинит вместе с акерманитом встречается в высокотемпературных известковистых скарнах [3], был обнаружен в виде включений в алмазах [7], а также является частым минералом в марте-новских, доменных и плавильных шлаках [8, 9].

Шпинель (MgAl_2O_4) является второстепенным минералом в шлаке с содержанием до 15 об.%. Она образует кубовидные кристаллы и их скопления, размером до 100–150 мкм (**рис. 2, 3**). В режиме обратно-рассеянных электронов (BSE) минерал выглядит самым темным из окружающих веществ. Интересно, что именно к скоплениям шпинели тяготеют выделения металла, образуя разрозненные включения, так и обрастания с периферией. Изучение химического состава шпинели показало, что она относится к титансодержащей разновидности (**табл. 3**). Из примесей в минерале отмечаются TiO_2 (до 2,7 мас.%), V_2O_3 (до 0,8 мас.%), CaO (до 0,4 мас.%) и MnO (до 0,3 мас.%). Интересно, что шпинель из алюминотермических шлаков ферротитанового производства Ключевского завода имеет более высокие примеси TiO_2 (в пределах 5,2–5,6 мас.%) и CaO (до 0,8 мас.%) при полном отсутствии марганца и ванадия [10]. Окраска алапаевской шпинели синяя, за счет чего у самой породы присутствует синеватый оттенок. По всей видимости, такая окраска вызвана присутствием титана, хотя природные и синтетические синие шпинели окрашены примесями кобальта или железа [11]. В природе благородная синяя шпинель встреча-

ется достаточно часто, в основном в связи с магнезиальными скарнами, как акцессорный минерал в магнезитовых и доломитовых мраморах [12]. При этом высокие содержания титана для природной шпинели нехарактерны и только в некоторых углистых хондритах отмечается повышенные примеси TiO_2 (до 0,9 мас.%) [13].

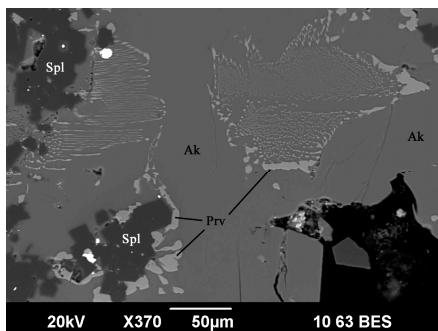


Рис. 3. Структуры распада первовскита (Prv) в акерманите (Ak) и обрастание кристаллов шпинели (Spl) в матрице шлака. BSE-изображение, СЭМ JSM-6390LV

Fig. 3. Structures of the decomposition of perovskite (Prv) in akermanite (Ak) and the growth of crystals of spinel (Spl) in a slag matrix. BSE image, SEM JSM-6390LV

Перовскит (CaTiO_3) так же, как и шпинель, является второстепенным минералом в шлаке с содержанием до 10 об.%. Перовскит образует два типа выделений: 1 – скелетные дендритовидные кристаллы, размером до 200 мкм; 2 – каплевидные ориентированные структуры распада в породообразующих силикатах, с размером индивидов в доли 1 мкм (см. **рис. 2, 3**). В режиме обратно-рассеянных электронов он выглядит самым светлым на фоне окружающих минералов, за исключением шариков металла. И, как более поздний по времени кристаллизации минерал, обрастает скоплением шпинели и металла. Он имеет устойчивый химический состав и вполне уверенно определяется как первовскит (**табл. 4**). Из примесей в минерале отмечаются Al_2O_3 (до 1,5 мас.%), SiO_2 (до 0,9 мас.%) и V_2O_3 (до 0,6 мас.%). Причем примесь ванадия присутствует только в тех зернах первовскита, которые ассоциируют с шариками металла. В шлаках первовскит встречается достаточно часто, к примеру, при ферротитановом и феррованадиевом производстве [10], а также в доменных шлаках [6 и др.]. В природе первовскит кристаллизуется в широком диапазоне температур и давлений, установлен и в скарнах, и в кимберлитах, а также в углистых хондритах [14].

Таблица 1. Химический состав акерманита из шлака Алапаевского завода, % (масс)

Table 1. Chemical composition of akermanite from slag from the Alapayevsk Metallurgical Plant, wt. %

№	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Сумма
1	39,42	0,58	9,10	10,62	40,28	100
2	38,89	0,51	9,13	10,25	41,23	100
3	38,74	0,57	10,07	10,23	40,39	100
4	38,30	0,61	10,74	10,03	40,32	100
5	38,26	0,38	11,04	10,05	40,27	100
6	38,68	0,45	10,16	10,43	40,28	100

Примечание. Здесь и далее, анализы сделаны на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV с ЭДС-приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 (ИГТ УрО РАН, аналитик Л.В. Леонова).

Таблица 2. Химический состав мервинита из шлака Алапаевского завода, % (масс)

Table 2. Chemical composition of merwinite from slag from the Alapayevsk Metallurgical Plant, wt. %

№	SiO ₂	TiO ₂	MgO	CaO	Сумма
1	36,57	0,69	11,75	50,99	100
2	36,88	0,66	12,23	50,23	100
3	37,17	0,60	12,57	49,67	100
4	36,51	0,80	11,98	50,72	100
5	36,29	0,76	11,89	51,06	100
6	37,21	0,76	12,04	49,99	100

Таблица 3. Химический состав шпинели из шлака Алапаевского завода, % (масс)

Table 3. Chemical composition of spinel from slag from the Alapayevsk Metallurgical Plant, wt. %

№	TiO ₂	V ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Сумма
1	1,99	0,59	68,61	-	28,52	0,28	100
2	2,06	0,65	68,21	0,16	28,70	0,22	100
3	2,65	0,68	67,55	0,21	28,68	0,24	100
4	2,05	0,52	68,39	0,20	28,49	0,35	100
5	2,10	0,49	68,61	-	28,55	0,25	100
6	2,14	0,74	68,25	0,23	28,45	0,19	100
7	2,47	0,79	67,50	0,26	28,62	0,37	100

Таблица 4. Химический состав перовскита из шлака Алапаевского завода, % (масс)

Table 4. Chemical composition of perovskite from slag from the Alapayevsk Metallurgical Plant, wt. %

№	SiO ₂	TiO ₂	V ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	Сумма
1	0,77	55,81	0,55	1,42	41,45	100
2	0,64	56,55	-	1,21	41,60	100
3	0,92	56,11	-	1,49	41,49	100
4	0,60	56,58	-	1,31	41,52	100
5	0,66	55,93	0,63	1,34	41,43	100

Металл (ванадиевый чугун) слагает в шлаках мелкие шарики или частично округлые выделения, обычно размером до 20–30 мкм, редко до 50–100 мкм. Содержание металла в породе не более 1–2 об.%. Шарики металла в режиме обратно-рассеянных электронов отчетливо видны и

состоят из двух фаз: более яркой в центре и более тусклой по краям или секущим прожилкам (рис. 4). По химическому составу эти фазы достаточно сильно отличаются содержанием ванадия (табл. 5, ан. 1–4). Центральные части чугуна, т.е. основная его масса, содержат около 0,6

мас.% ванадия, а каймы и прожилки обогащены ванадием до 3,2 мас.%. Кроме того, с резким ростом ванадия отмечается и повышение концентрации марганца и хрома.

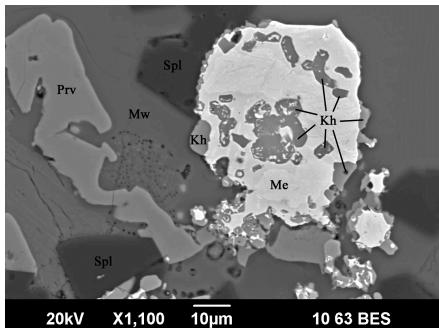


Рис. 4. Зональный шарик чугуна (Me) с включениями хамрабаевита (Kh) в агрегате мервинита (Mw), спинели (Spl) и перовскита (Prv). BSE-изображение, СЭМ JSM-6390LV

Fig. 4. A zone ball of cast iron (Me) with the inclusions of khamraevite (Kh) in the aggregate of merwinite (Mw), spinel (Spl) and perovskite (Prv). BSE image, SEM JSM-6390LV

Хамрабаевит (Ti,V,Fe) C . Шарики чугуна всегда содержат изометричные и удлиненные включения $Ti-V$ -карбида, а также частично обрастают (в виде оболочек или скорлупок) этим же веществом или срастаются с ним. Размер зерен карбида титана и ванадия не превышает 10 мкм. По составу он отличается более высоким содержанием углерода (до 20 мас.%) по сравнению с чугуном, за счет чего и имеет серую окраску в режиме BSE. По соотношению таких элементов, как титан, ванадий и железо минерал вполне уверен

определеняется как хамрабаевит (табл. 5, ан. 5–8). Причем интересно, что включения карбида в чугуне более ванадиевые, чем зерна с периферией. В шлаках хамрабаевит встречается достаточно часто и упоминается просто как карбид титана, причем в основном при описании доменной плавки титаномагнетитовых руд [15 и др.]. В природе хамрабаевит был установлен в ассоциации с силлицидом железа (зюсситом) в базальтах и гранитоидах Средней Азии [16], в океанических базальтах Восточно-Тихоокеанского поднятия [17], а также в парагенезисе с тистаритом, хибонитом и корундом в углистом хондрите Альянде, найденном в Мексике [18].

Температуру кристаллизации изученного шлака можно оценить по минералу-индикатору – акерманиту. Так, по результатам моделирования в системе геленит-акерманит [18], по содержанию глиноземистой молекулы геленита в матрице акерманита, температура кристаллизации шлака оценивается в пределах 1400–1390°C.

Установленная минеральная ассоциация изученных шлаков позволяет говорить о том, что мы имеем дело с отходами ферросплавного производства. А точнее, с первой стадией получения феррованадия, когда в результате доменной плавки ванадийсодержащего титаномагнетитового концентрата образуется ванадиевый чугун, из которого уже потом по сложной цепочке и производят феррованадий. Интересно, что информации об изготовлении данного вида продукции Алапаевским металлургическим заводом практически нет, на слуху был только ферромарганец. Есть только один источник информации (устаревший сайт самого завода), где было написано, что предприятие предлагает широкий спектр производства ферросплавов, в том числе и феррованадия.

Таблица 5. Химический состав чугуна и хамрабаевита из шлака Алапаевского завода, % (масс)

Table 5. Chemical composition of cast iron and khamraevite from slag from the Alapayevsk Metallurgical Plant, wt. %

№	C	P	Si	Ti	V	Cr	Fe	Mn	Ca	Сумма
Ванадиевый чугун										
1	3,42	0,54	0,34	0,47	0,64	0,31	93,16	0,95	0,17	100
2	4,17	0,54	0,38	0,51	0,63	0,29	92,38	0,88	0,22	100
3	3,84	-	0,30	0,64	3,10	0,48	89,55	1,60	0,49	100
4	3,96	-	0,26	0,48	3,21	0,43	89,78	1,61	0,27	100
Хамрабаевит										
5	19,55	-	0,17	49,60	28,59	-	1,93	-	0,16	100
6	19,11	-	0,19	47,11	28,00	-	5,31	-	0,28	100
7	18,76	-	0,18	58,20	19,43	-	3,21	-	0,22	100
8	20,01	-	0,32	66,28	11,58	-	0,94	-	0,87	100

Изученные нами шлаки можно пускать в дополнительную переработку, т.к. они содержат легко выделяемые ванадиевый чугун и первоскит. Содержание последнего достигает 10 об.%, и он является рудой на титан. Кроме того, шпинель и хамрабаевит, как очень твердые минералы (8 и 9–9,5 по шкале Мооса соответственно), могут быть выделены из шлака на абразивы.

Заключение

Таким образом, впервые изучена минералогия шлаков феррованадиевого производства Алапаевского металлургического завода. Установлено, что они сложены акерманит-

мервинитовым агрегатом с значительным содержанием шпинели и первоскита, а также постоянным присутствием шариков чугуна и хамрабаевита. Данные шлаки являются отходами ферросплавного производства, а точнее, первичной стадией получения феррованадия, когда в результате доменной плавки ванадийсодержащего титаномагнетитового концентрата образуется ванадиевый чугун, из которого уже потом по сложной цепочке и производят феррованадий. Температура образования данных шлаков определена по содержанию глиноземистой молекулы геленита в матрице акерманита, она оценивается в пределах 1400–1390°C.

Список литературы

1. Займогов А.И. Синячихинские железоделательные заводы. Екатеринбург: ООО «Грачев и Партнеры», 2011. 118 с.
2. Металлургические заводы Урала XVII – XX вв. Энциклопедия / под ред. В.В. Алексеева. Екатеринбург: Академника, 2001. 536 с.
3. Магнезиальные скарны мервинитовой фации из ксенолитов в дунитах Довыренского расслоенного массива / Перцев Н.Н., Конников Э.Г., Кислов Е.В., Орсоев Д.А., Некрасов А.Н. // Петрология. 2003. Т. 11. № 5. С. 512–523.
4. Уникальные клинкеры и паралавы нового Нилгинского пирометаморфического комплекса в Центральной Монголии: минералого-geoхимические особенности, условия формирования / Перетяжко И.С., Савина Е.А., Хромова Е.А., Карманов Н.С., Иванов А.В. // Петрология. 2018. Т. 26. № 2. С. 178–210. doi:10.7868/S086959031802005X
5. Иванова М.А. Ca,Al-включения в углистых хондритах – самые древние образования Солнечной системы // Геохимия. 2016. № 5. С. 409–426. doi:10.7868/S0016752516050034
6. Минералогия доменных шлаков / Горбатова Е.А., Харченко С.А., Ожогина Е.Г., Якушина О.А. // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 4. С. 24–28. doi:10.19110/2221-1381-2017-4-24-28
7. Zedgenizov D.A., Shatskiy A., Ragozin A.L., Kagi H., Shatsky V.S. Merwinite in diamond from São Luiz, Brazil: A new mineral of the Ca-rich mantle environment // American Mineralogist. 2014. V. 99. P. 547–550. doi:10.2138/am.2014.4767
8. Технологические особенности переработки сталеплавильных шлаков в строительные материалы и изделия / Леонтьев Л.И., Шешуков О.Ю., Цепелев В.С., Михеенков М.А., Некрасов И.В., Егиазарьян Д.К. // Строительные материалы. 2014. № 10. С. 70–73.
9. Пономарев В.С., Ерохин Ю.В., Михеева А.В. Геленитовый шлак с восточного борта Меднорудянского месторождения // Минералогия техногенеза – 2018. Миасс: ИМиН УрО РАН, 2018. С. 81–94.
10. Техногенное минеральное сырье Урала / Перепелицын В.А., Рытвин В.М., Коротеев В.А., Макаров А.Б., Григорьев В.Г., Гильварг С.И., Абызов В.А., Абызов А.Н., Табулович Ф.А. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. 332 с.
11. DiPippo V., Andreozzi G.B., Bosi F., Hälenius U. Blue spinel crystals in the MgAl₂O₄-CoAl₂O₄ series: Part I. Flux growth and chemical characterization // American Mineralogist. 2012. V. 97. P. 1828–1833. doi:10.2138/am.2012.4138
12. Chauviré B., Rondeau B., Fritsch E., Ressigec P., Devidal J.-L. Blue spinel from the Luc Yen district of Vietnam // Gems & Gemology. 2015. V. 51. № 1. P. 2–17. doi:10.5741/GEMS.51.1.2
13. Bjärnborg K., Schmitz B. Large spinel grains in a CM chondrite (Acfer 331): Implications for reconstructions of ancient meteorite fluxes // Meteoritics and Planetary Science. 2013. V. 48. No. 2. P. 180–194. doi:10.1111/maps.12050
14. Russell S.S., Huss G.R., Fahey A.J., Greenwood R.C., Hutchison R., Wasserburg G.J. An isotopic and petrologic study of calcium-aluminum-rich inclusions from CO₃ meteorites // Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998. V. 62. No. 4. P. 689–714. doi:10.1016/S0016-7037(97)00374-8
15. Собянина О.Н., Филатов С.В., Загайнов С.А. Анализ особенностей восстановления титана в доменной печи // Сталь. 2012. № 3. С. 9–11.
16. Хамрабаевит (Ti,V,Fe)C – новый минерал / Новгородова М.И., Юсупов Р.Г., Дмитриева М.Т., Цепин А.И., Сивцов А.В., Горшков А.И. // Записки ВМО. 1981. Ч. 113. Вып. 6. С. 697–703.
17. Jedwab J., Boulegue J. A vanadium-titanium carbide inclusion in graphite from hydrothermal ejecta at 130N, East

- Pacific Rise // Canadian Mineralogist. 1989. V. 27. P. 617–623.
18. Ma C., Rossman G.R. Tistarite, Ti_2O_3 , a new refractory mineral from the Allende meteorite // American Mineralogist. 2009. V. 94. P. 841–844. doi:10.2138/am.2009.3203
19. Mundybaev R.A., Richter F.M., Davis A.M. Reevaluation of the akermanite-gehlenite binary system // XXXVII Lunar and Planetary Science Conf. Abstr. № 2268. Woodlands (TX), 2006.

References

1. Zaymogov A.I. *Sinyachikhinskie zhelezodelatelnye zavody* [Sinyachikha ironworks]. Yekaterinburg: LLC Grachev and Partners, 2011, 118 p. (In Russ.)
2. Alekseev V.V. (ed.) *Metallurgicheskie zavody Urala XVII–XX vv. Entsiklopediya*. [Metallurgical plants of the Urals in the 17th–20th centuries. Encyclopedia]. Yekaterinburg: Academic Book Publishing House, 2001, 536 p. (In Russ.)
3. Pertsev N.N., Konnikov E.G., Kislov E.V., Orsoev D.A., Nekrasov A.N. Merwinite-facies magnesian skarns in xenoliths from dunite of the Doyrven layered intrusion. Petrology, 11, 5, 464–475 (2003).
4. Peretyazhko I.S., Savina E.A., Khromova E.A., Karmanov N.S., Ivanov A.V. Unique clinkers and paralavas from a new Nilga combustion metamorphic complex in Central Mongolia: mineralogy, geochemistry and genesis. Petrology, 26, 2, 181–211 (2018). doi:10.1134/S0869591118020054
5. Ivanova M.A. Ca-Al-rich inclusions in carbonaceous chondrites: the oldest solar system objects. Geochemistry, 54, 5, 387–402 (2016). doi:10.1134/S0016702916050037
6. Gorbatova E.A., Kharchenko S.A., Ozhogina E.G., Yakushina O.A. Mineralogy of blast furnace slags. *Vestnik IG Komi NTS UrO RAN* [Vestnik of the Komi Institute of Geology, the Scientific Center of the Ural Branch of RAS], 2017, no. 4, pp. 24–28. doi:10.19110/2221-1381-2017-4-24-28.
7. Zedgenizov D.A., Shatskiy A., Ragozin A.L., Kagi H., Shatsky V.S. Merwinite in diamond from São Luiz, Brazil: A new mineral of the Ca-rich mantle environment. Amer. Miner. 99, 547–550 (2014). doi:10.2138/am.2014.4767
8. Leontev L.I., Sheshukov O.Yu., Tsepelev V.S., Mikheenkov M.A., Nekrasov I.V., Egiazaryan D.K. Technological features of steelmaking slag processing into building materials and products. *Stroitelnye materialy* [Construction Materials], 2014, no. 10, pp. 70–73. (In Russ.)
9. Ponomarev V.S., Erokhin Yu.V., Mikheeva A.V. Gehlenite slag from the eastern side of the Mednorudynsky deposit. *Mineralogiya tekhnogeneza – 2018* [Mineralogy of Technogenesis – 2018]. Miass: Mineralogy Institute, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2018, pp. 81–94. (In Russ.)
10. Perepelitsyn V.A., Rytvin V.M., Koroteev V.A., Makarov A.B., Grigoryev V.G., Gilvarg S.I., Abyzov V.A., Abyzov A.N., Tabulovich F.A. *Tekhnogennoe mineralnoe syrье Урала* [Man-made mineral raw materials of the Urals]. Yekaterinburg: Publishing Department of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2013, 332 p. (In Russ.)
11. D’Ippolito V., Andreozzi G.B., Bosi F., Hälenius U. Blue spinel crystals in the $MgAl_2O_4$ - $CoAl_2O_4$ series: Part I. Flux growth and chemical characterization. Amer. Miner. 97, 1828–1833 (2012). doi:10.2138/am.2012.4138
12. Chauviré B., Rondeau B., Fritsch E., Ressigec P., Devidal J.-L. Blue spinel from the Luc Yen district of Vietnam. Gems & Gemology, 51, 1, 2–17 (2015). doi:10.5741/GEMS.51.1.2
13. Bjärnborg K., Schmitz B. Large spinel grains in a CM chondrite (Acfer 331): Implications for reconstructions of ancient meteorite fluxes. Meteor. Planet. Sci. 48, 2, 180–194 (2013). doi:10.1111/maps.12050
14. Russell S.S., Huss G.R., Fahey A.J., Greenwood R.C., Hutchison R., Wasserburg G.J. An isotopic and petrologic study of calcium-aluminum-rich inclusions from CO3 meteorites. Geochim. Cosmoch. Acta. 62, 4, 689–714 (1998). doi:10.1016/S0016-7037(97)00374-8
15. Sobyanin O.N., Filatov S.V., Zagaynov S.A. Analysis of the features of titanium reduction in a blast furnace. *Stal [Steel]*, 2012, no. 3, pp. 9–11. (In Russ.)
16. Novgorodova M.I., Yusupov R.G., Dmitrieva M.T., Tsepina A.I., Sivtsov A.V., Gorshkov A.I. Khamrabaeite (Ti,V,Fe,C) is a new mineral. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva* [Proceedings of the All-Union Mineralogical Society], 1981, vol. 113, no. 6, pp. 697–703. (In Russ.)
17. Jedwab J., Boulegue J. A vanadium-titanium carbide inclusion in graphite from hydrothermal ejecta at 13°N, East Pacific Rise. Canad. Miner. 27, 617–623 (1989).
18. Ma C., Rossman G.R. Tistarite, Ti_2O_3 , a new refractory mineral from the Allende meteorite. Amer. Miner. 94, 841–844 (2009). doi:10.2138/am.2009.3203
19. Mundybaev R.A., Richter F.M., Davis A.M. Reevaluation of the akermanite-gehlenite binary system. XXXVII Lunar and Planetary Science Conf. Abstr. No. 2268. Woodlands (TX), 2006.

Поступила 06.02.2020; принята к публикации 10.03.2020; опубликована 25.06.2020
Submitted 06/02/2020; revised 10/03/2020; published 25/06/2020

Ерохин Юрий Викторович – канд. геол.-мин. наук, вед. науч. сотрудник,
Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
E-mail: erokhin-yu@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0577-5898

Захаров Анатолий Владимирович – науч. сотрудник,
Институт геологии и geoхимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
Email: zakharov-zav@yandex.ru. ORCID 0000-0001-8790-7892

Леонова Любовь Владимировна – канд. геол.-мин. наук, ст. науч. сотрудник,
Институт геологии и geoхимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
E-mail: lvleonova@yandex.ru. ORCID 0000-0002-7713-8994

Yury V. Erokhin – PhD (Geology and Mineralogy), Lead Researcher,
Institute of Geology and Geochemistry, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russia. Email: erokhin-yu@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0577-5898

Anatoly V. Zakharov – Researcher,
Institute of Geology and Geochemistry, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russia. Email: zakharov-zav@yandex.ru. ORCID 0000-0001-8790-7892

Lyubov V. Leonova – PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher,
Institute of Geology and Geochemistry, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russia. Email: lvleonova@yandex.ru. ORCID 0000-0002-7713-8994