

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ МИНЕРАЛОГО-АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗУЧЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ

Горбатова Е.А.¹, Ожогина Е.Г.¹, Лебедев А.Н.¹, Емельяненко Е.А.², Харченко А.С.², Селиванов В.Н.²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М.Федоровского, Москва, Россия

² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): в статье показаны возможности современного комплекса минералого-аналитических методов при изучении технического камня, применение которого позволяет получить полную и достоверную информацию о вещественном составе и морфоструктурных особенностях минеральных фаз, моделировать процессы минералообразования, формирующих технический камень, давать прогноз направлений дальнейшего применения технического сырья с учетом экономических потребностей региона. На примере исследований доменных шлаков продемонстрирована целесообразность комплексирования традиционных минералогических методов (оптическая микроскопия, количественный рентгенографический анализ) с методами электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа. **Цель работы:** обоснование целесообразности комплексирования минералого-аналитических методов изучения металлургических шлаков. **Используемые методы:** современный комплекс минералого-аналитических методов – оптическая микроскопия (оптико-петрографический и минераграфический анализы), количественный рентгенографический анализ, электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ. Минералогические исследования регламентированы методической документацией, утвержденной Научным советом по минералогическим методам исследования. **Новизна:** к элементам новизны относится новый методический подход к изучению вещественного состава шлаков комплексом методов минералогического анализа. **Результат:** в статье представлены результаты исследований металлургических доменных шлаков. Оптимальный комплекс методов позволил определить фазовый состав шлаков, реальный химический состав установленных фаз, распределение химических компонентов в плоскости зерна, изучить морфологические особенности шлакообразующих минеральных фаз и их пространственные взаимоотношения, что позволило установить последовательность и механизм образования фаз. **Практическая значимость:** полученные данные дают полное представление о фазовом составе изучаемых шлаков и механизме формирования конечных шлаков в горне доменной печи.

Ключевые слова: доменные шлаки, вещественный состав, техногенное минеральное сырье, минералого-аналитические методы, комплексирование, минеральные фазы, акерманит, ольдгамит, скелетно-дендритные кристаллы.

Введение

В металлургическом производстве черных металлов накоплено огромное количество многообразных техногенных образований. Так, запасы доменных шлаков ПАО «ММК» составляют более 40 млн т [1]. Кроме того, ежегодно их образуется более 3 млн т [2]. Из них на конец 2014 года перерабатывалось 2,23 млн т текущих и 1,52 млн т отвальных доменных шлаков [1]. За 2015 г. в Российской Федерации слито в отвал 15,5% доменного шлака [2]. Накопленные отходы нарушают городской ландшафт и отчуждают земельные угодья, негативно воздействуют на окружающую природную среду.

Вместе с тем шлаки металлургического производства являются ценным техногенным минеральным сырьем, имеют спрос в металлургии, сельском хозяйстве, химической промышленно-

сти, медицине, дорожном и гидротехническом строительстве, при производстве строительных материалов и в других отраслях [1, 3–7]. Шлаки являются более дешевым и прочным сырьем по сравнению с природными материалами и используются как заменитель песка [8–11]; при производстве вяжущих, шлакощелочных вяжущих и бетона, заполнителя для бетона [12], шлакопортландцемента, строительных материалов и изделий [13–15]; для получения шлакового щебня; шлакоситаллов; каменного литья [16]; шлаковой ваты, применяемой в качестве теплоизоляционного материала; при производстве облицовочных плит и тюбингов при строительстве метро и в других отраслях промышленности. Вовлечение в переработку доменных шлаков ПАО «ММК» позволяет снизить себестоимость конечной продукции предприятия, уменьшить негативное влияние на окружающую среду [17].

Выбор направления использования доменных

© Горбатова Е.А., Ожогина Е.Г., Лебедев А.Н., Емельяненко Е.А., Харченко А.С., Селиванов В.Н., 2017

шлаков зависит от ряда факторов: вещественного состава, их агрегатного состояния, количества, технологических особенностей и т.д., а также от социально-экономических потребностей региона [18]. Изучением вещественного и минералогического состава шлаков занимается техническая минералогия и петрография. Традиционные минералогические методы (оптическая микроскопия, рентгенографический количественный анализ) не дают полной информации о сложном техногенном минеральном сырье, поэтому целесообразным становится применение нового методологического подхода к проведению анализа доменных шлаков – комплексирование минералого-аналитических методов, который позволит с высокой степенью достоверности определять качественные показатели минерального сырья, а также реконструировать последовательность и условия образования минеральных фаз шлака.

Объект и методы исследования

Объект исследования – доменные шлаки ПАО «ММК».

В изучении использовался комплекс минералого-аналитических методов, включающий оптическую микроскопию (оптико-петрографический и минераграфический методы), количественный рентгенографический анализ, электронную микроскопию и рентгеноспектральный микроанализ и позволяющий получить полную информацию о минеральном (фазовом) составе и структурно-текстурных особенностях шлака. Последовательность и объемы минералогических работ регламентированы методической документацией, утвержденной Научным советом по минералогическим методам исследования [19].

Оптико-петрографический метод позволяет выявлять особенности строения шлаков, диагностировать нерудные минералы, уточнять взаимоотношения между минералами, судить об условиях и последовательности их формирования [20].

Минераграфический метод позволяет идентифицировать рудные минералы, имеющие отражение более 10%, определять их морфоструктурные особенности и последовательность выделения минералов [21].

Рентгенографический количественный фазовый анализ – ведущий метод количественного минералогического анализа технического камня. В зависимости от элементного состава фазы и совершенства ее кристаллической структуры метод обеспечивает диагностику и количественную оценку всех кристаллических фаз, размеры индивидов в которых более 0,02 мкм, а содержа-

ние – выше 0,5–1,0 вес. % [22].

Растровая электронная микроскопия (РЭМ) позволяет выявлять и изучать особенности состава и строения главных рудных минералов, присутствующих в весьма незначительных количествах [23].

Рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) устанавливает форму нахождения элементов и их связь с матрицей минерала, диагностирует минералы путем расчета кристаллохимической формулы [24].

Комплексирование методов минералогического анализа позволяет получить необходимую и достоверную информацию о вещественном составе и строении доменных шлаков.

Минералогические исследования

Доменный шлак ПАО «ММК» является гетерогенным техническим образованием.

Текстура пористая, форма пор изменяется от изометричной до вытянутой и неправильной, размер пор варьирует от долей до десяти миллиметров в диаметре. Структура шлака порфириподобная, близкая к интерсертальной и сферолитовой. Вкрапленники, представленные крупными и хорошо окристаллизованными тонкопластинчатыми зернами акерманита, расположены в массе шлака беспорядочно и часто пересекаются с образованием угловатых промежутков. Строение основной массы шлака полнокристаллическое, локализуется в интерстициях между вкрапленниками минеральных агрегатов псевдоволластонита, фаялита, диопсида и скелетных образований ольдгамита. Также в шлаке отмечаются участки, выполненные пучкообразными агрегатами стекла неправильной формы.

Химический состав шлаков (% по массе): %: SiO₂ – 39,1; CaO – 40,1; Al₂O₃ – 11,3; MgO – 7,2; MnO – 0,33; S – 0,84; FeO – 0,9.

Главные шлакообразующие фазы представлены минералами группы мелилита и псевдоволластонитом (79–94%), второстепенные – фаялитом, диопсидом, ольдгамитом, перовскитом, якобитом, биксбитом, ферритом (3%). Аморфная составляющая не превышает 18%.

Минералы группы мелилита составляют основную часть шлака, их содержание достигает 60–75%. По данным рентгеноспектрального микроанализа в состав акерманита входит 67,8% молекул акерманита Ca₂Mg[Si₂O₇], 29,6% – геленита Ca₂Al[AlSiO₇], 2,6% – молекул Na₂[Si₃O₇] (**табл. 1**). Характерно присутствие двуоксида титана – до 0,18% TiO₂, оксида железа – до 0,17% FeO и оксида марганца – до 0,15% MnO.

Таблица 1
Химический состав акерманита, % (масс)

Ca ₂ Mg[Si ₂ O ₇]			Ca ₂ Al[AlSiO ₇]			Na ₂ [Si ₃ O ₇]	
MgO	CaO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	SiO ₂
9,73	27,25	29,19	12,58	11,23	6,74	0,84	2,44
10,10	28,30	30,31	11,67	10,42	6,25	0,75	2,19
10,11	28,32	30,33	11,92	10,63	6,38	0,59	1,73
10,06	28,17	30,17	12,19	10,88	6,53	0,51	1,49
10,43	29,22	31,30	11,11	9,92	5,95	0,53	1,53
9,84	27,57	29,53	12,21	10,90	6,54	0,87	2,53
9,55	26,76	28,66	12,89	11,51	6,90	0,95	2,78
10,16	28,47	30,49	11,89	10,61	6,37	0,51	1,49
9,85	27,58	29,54	12,28	10,96	6,58	0,82	2,38
9,89	27,69	29,66	12,67	11,31	6,78	0,51	1,49
9,98	27,95	29,93	12,53	11,18	6,71	0,44	1,28
10,05	28,14	30,14	12,03	10,74	6,44	0,63	1,85
9,88	27,68	29,65	11,97	10,68	6,41	0,95	2,77
9,92	27,79	29,77	12,35	11,02	6,61	0,65	1,89
9,96	27,90	29,89	12,38	11,05	6,63	0,56	1,63

Рентгеноспектральным микроанализом установлена однородность химического состава минерала как в продольном, так и в поперечном направлениях относительно удлинения сечения зерна (**рис. 1**).

Акерманит образует короткопризматические кристаллы, в шлифах наблюдаются изометричные сечения или лейсты (**рис. 2, а, б**). Размер сечений кристаллов варьирует от 0,3 до 2,0 мм по длинной оси с преобладанием 0,8–1,5 мм. Соотношение длины к ширине изменяется от 1/3 до 1/15.

Во внешней зоне кристаллов акерманита отмечаются крупные скелетно-дендритные формы ольдгамита (**рис. 2, в, г**), а в центральной части индивидов мельчайшие каплевидные включения ферритов (размером не более 5 мкм) (**рис. 3**).

Псевдоволластонит – второй по распространению в доменных шлаках минерал. Содержание достигает 19%. Размер агрегатов варьирует от 0,1 до 0,4 мм. В интерстициях между кристаллами акерманита псевдоволластонит располагается перпендикулярно или под углом к граням его кристаллов, образуя параллельные сростки с ним, а также со скелетными формами ольдгамита (**рис. 4**).

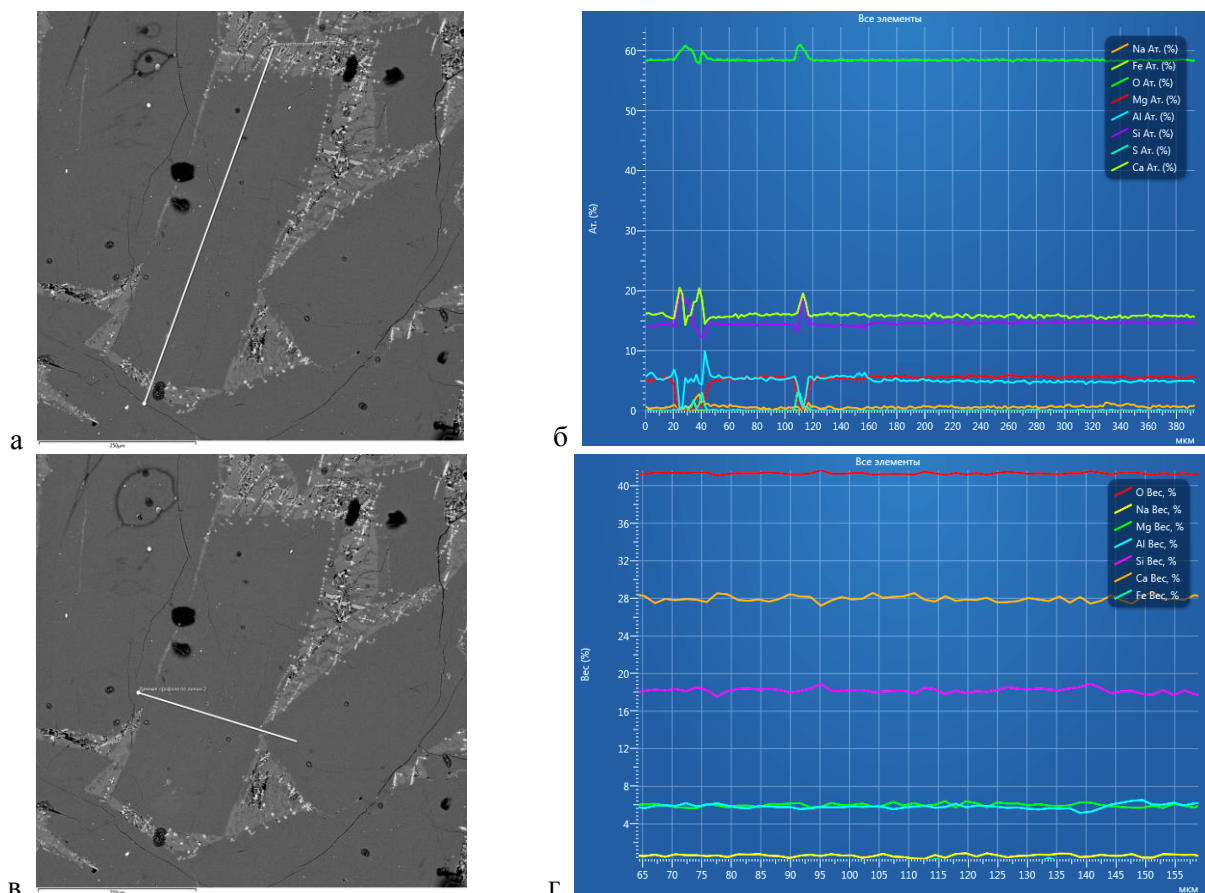


Рис. 1. Распределение химических элементов в продольном (а, б) и в поперечном направлениях относительно удлинения сечения зерна (в, г). РСМА

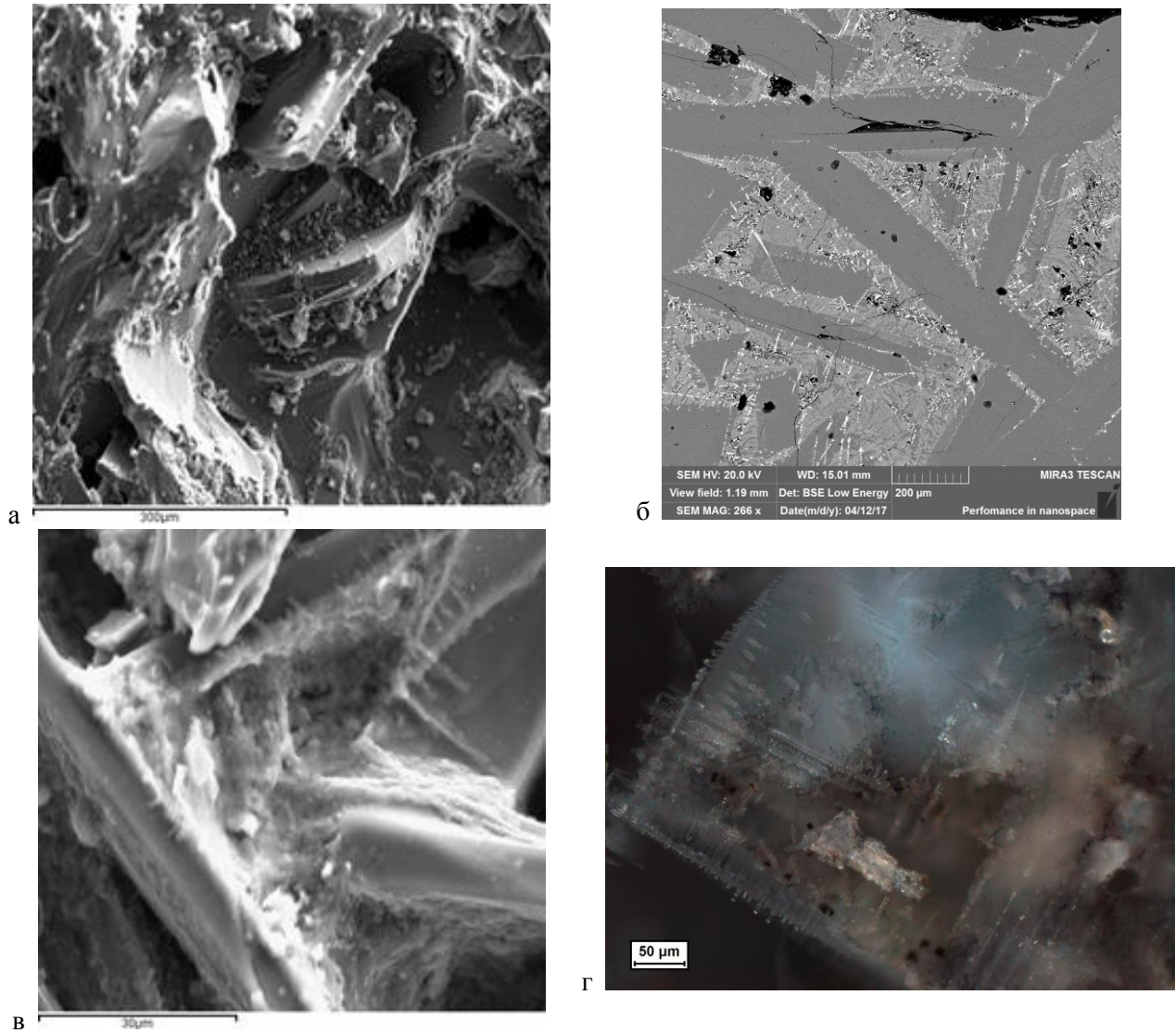


Рис. 2. Морфологические разновидности минералов: а – короткопризматические кристаллы акерманита; б – сечения кристаллов акерманита; в – скелетно-дендритные кристаллы ольдгамита. РЭМ (а, в), РСМА (б); отраженный свет, николи скрещены (г)

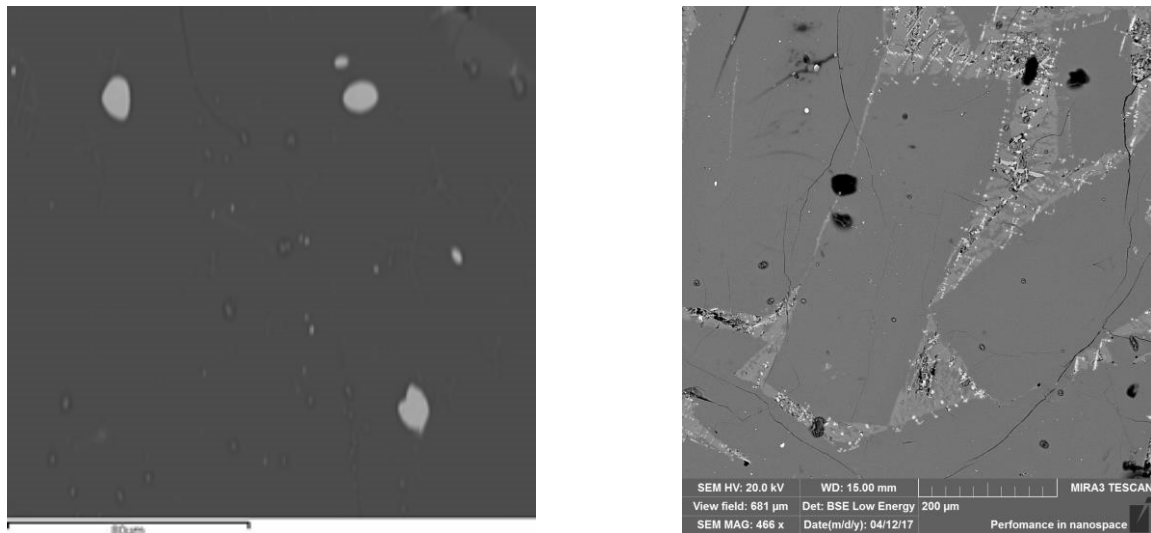


Рис. 3. Каплевидные выделения феррита. РСМА

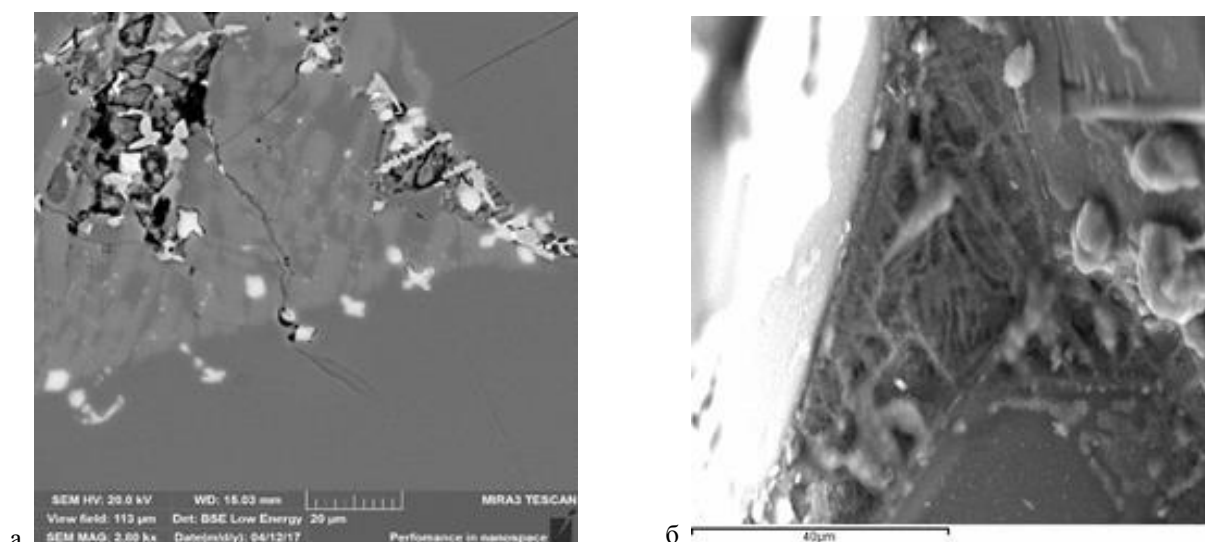


Рис. 4. Параллельные сростки псевдоволластонита и акерманита. РСМА (а), РЭМ (б)

По данным рентгеноспектрального микроанализа химический состав минерала (табл. 2) определен, как близкий к псевдоволластониту, что также подтверждается высокой температурой кристаллизации шлака.

Таблица 2

Химический состав псевдоволластонита

Компоненты	Содержание, % (масс)					
	CaO	48,42	48,35	48,26	48,44	48,45
SiO ₂	51,07	51,16	51,23	51,24	51,25	49,75
Al ₂ O ₃	0,38	0,31	0,25	0,17	0,23	1,66
Na ₂ O	0,12	0,18	0,26	0,15	0,07	0,28

Фаялит и *диопсид* встречаются в подчиненном количестве (менее 1%) и образуют небольшие выделения в интерстициях между зернами акерманита. С этими минералами связана концентрация *якобсита*, *биксбиита* и *перовскита*.

Рудные минералы в шлаке не превышают 3% и представлены *ольдгамитом*, *перовскитом*, *якобситом*, *биксбиитом*, *ферритом*. Следует отметить, определение *ольдгамита* было достигнуто только в результате комплексирования оптической и электронной микроскопии.

Ольдгамит и *перовскит* в шлаках образуют скелетно-дендритные реберно-вершинные кристаллы с ветвями разных порядков. На морфологию кристаллов рудных минералов накладывает отпечаток симметрия среды. Поскольку рост кристаллических скелетов происходит от граней кристаллов акерманита или совместно с ними, то симметрия среды – $L_{\infty} \propto P$. Размеры субиндивидов, слагающих скелетно-дендритные кристаллы, не превышают 20 мкм.

Феррит «пропитал» кристаллы акерманита, распределение неравномерное. Он образует круглые выделения до овальных (см. рис. 3). Размер феррита менее 10 мкм.

Обсуждение результатов исследований

Выявленные минералогические особенности шлаков позволяют предположить механизм их образования. Процесс кристаллизации шлака псевдоволластонит-мелилитового состава описан диаграммой равновесия трёхкомпонентной системы геленит-акерманит-псевдоволластонит (рис. 5) [23].

По ионной теории О.А. Есина и с учетом кристаллохимического принципа, первыми из шлакового расплава выделяются минералы, содержащие комплексные анионы в виде изолированных группировок ($\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$), отвечающие острым силикатам и алюмосиликатам группы мелилита (Есин, 1968).

Диаграмма состояния геленит — акерманит является примером бинарной системы твердых растворов с минимум температуры плавления 1390°C (рис. 6). Точка минимума характеризуется нулевым интервалом кристаллизации и идентичностью составов жидкости и кристаллов.

Следует отметить, что пересчет химического состава мелилита без натриевой молекулы соответствует 70% акерманитовой составляющей и 30% геленитовой, что практически отвечает химическому составу точки минимума (73% акерманита и 27% геленита) непрерывного твердого раствора. Поскольку исследованиями установлено, что минералы геленит-акерманитового состава характеризуются, практически, однородным химическим составом, в зернах не наблюдается зонального строения, обусловленное разным химическим составом, было предположено, что наличие щелочи в составе минерала группы мелилита смещает точку минимума.

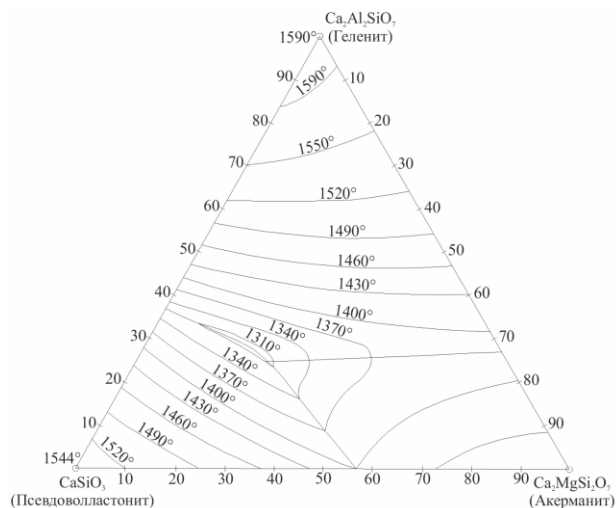


Рис. 5. Фазовый состав доменных шлаков в системе геленит-акерманит-псевдоволластонит [23]

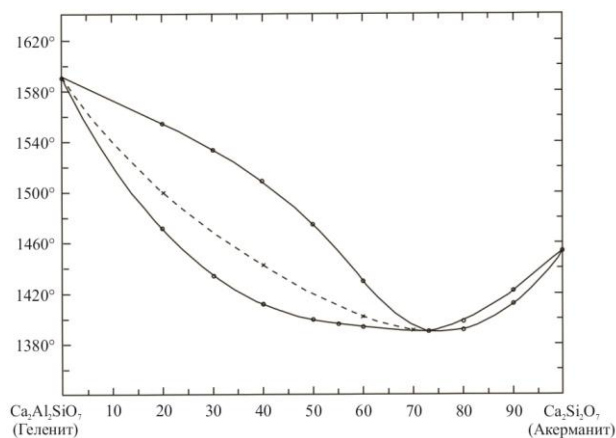


Рис. 6. Диаграмма состояния геленит-акерманит [23]

Акерманит, кристаллизуясь из расплава, образует порфиридные выделения (см. рис. 2, б). Примесные компоненты, не участвующие в их построении, отталкиваются и накапливаются у фронта роста в кристаллизационном дворике [24]. По мере роста кристаллов акерманита концентрация серы в расплаве увеличивается, что приводит к локальной гетерогенизации среды. Вследствие этого ольдгамит выделяется в виде самостоятельных примесных фаз на фронте роста кристаллов акерманита, несмотря на низкое исходное содержание серы. Он образует крупные скелетно-дендритные реберно-вершинные формы во внешних зонах кристаллов акерманита (см. рис. 2, в, г). Ольдгамит концентрирует в себе всю серу шлакового расплава.

По мере снижения температуры расплава, происходит последовательное усложнение ионных группировок – от комплексных анионов с

замкнутыми группами ($\text{Si}_3\text{O}_9^{6-}$), соответствующих кольцевым метасиликатам, к бесконечным кремнекислородным цепочкам $(\text{SiO}_3)_n$. В интерстициях между кристаллами акерманита наблюдается его совместный рост с псевдоволластонитом при достижении эвтектических условий. Минеральные фазы формируют параллельные выделения, ориентированные перпендикулярно или под определенным углом относительно кристаллов акерманита (см. рис. 3).

Кроме того, в интерстициях кристаллизуются скелетно-дендритные формы ольдгамита и перовскита. Одними из самых последних формируются единичные выделения фаялита и диопсида.

Заключение

Получение полной и достоверной информации о составе и строении доменных шлаков необходимо для определения последовательности и условий образования минеральных фаз шлака и осуществимо только за счет рационального сочетания минералого-аналитических методов.

Для изучения вещественного состава шлака предложен новый комплексный методический подход. Он включает оптическую микроскопию (оптико-петрографический и минераграфический анализы), количественный рентгенографический анализ, электронную микроскопию и рентгеноспектральный микроанализ.

Комплексирование минералого-аналитических методов изучения металлургических шлаков позволило определить фазовый состав шлаков, реальный химический состав установленных фаз, распределение химических компонентов в плоскости зерна, изучить морфологические особенности шлакообразующих минеральных фаз и их пространственные взаимоотношения, что позволило установить последовательность и условия образования минеральных фаз шлака.

В результате комплексирования оптической и электронной микроскопии выявлено, что рудные минералы представлены ольдгамитом, перовскитом, якобитом, биксбитом, ферритом.

Список литературы

1. Панишев Н.В., Бигеев В.А., Галиуллина Е.С. Переработка металлургических шлаков в ОАО «ММК» // Металлургия: технологии, инновации, качество / под общ. ред. Е.В. Протопопова. Новокузнецк, 2015. С. 377–379.
2. Третьяк А.А. Доменное производство России в 2011–2016 годы // Металлургия чугуна – вызовы XXI века: труды VIII международного конгресса доменщиков. М.: Изд. Дом «Кодекс», 2017. С. 21–35.

3. Панишев Н.В., Бигеев В.А., Галиуллина Е.С. Использование колошниковой пыли в производстве комплексного флюса // *Металлургия: технологии, инновации, качество* / под общ. ред. Е.В. Протопопова. Новокузнецк, 2015. С. 285–288.
4. Панишев Н.В., Бигеев В.А., Галиуллина Е.С. Перспективы утилизации хвостов углеобогащения и твердых отходов тепловых электростанций // *Теория и технология металлургического производства*. 2015. № 2 (17). С. 69–76.
5. Переработка мелкозернистых отходов металлургического производства с получением гранулированного чугуна и извлечением цинка / Н.В. Панишев, В.А. Бигеев, А.А. Черняев, А.В. Пантелеев // *Теория и технология металлургического производства*. 2014. № 2 (15). С. 101–105.
6. Панишев Н.В., Бигеев В.А., Черняев А.А. Переработка мелкозернистых отходов металлургического производства с получением гранулированного чугуна и извлечением цинка // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. № 4 (44). С. 26–29.
7. Основы металлургического производства: учебник [Электронный ресурс] / В.А. Бигеев [и др.]. Электрон. дан. СПб.: Лань, 2017. 616 с. Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/90165>. Загл. с экрана.
8. Sudarvizhi Meenakshi S, Ilangoan. R. Performance of Copper slag and ferrous slag as partial replacement of sand in Concrete // *International Journal of Civil And Structural Engineering*, Volume 1, no. 4, 2011. (ISSN 0976-4399).
9. Jadhav Priyanka A., and Kulkarni Dilip K. Effect of Replacement of Natural Sand By Manufactured Sand on the Properties of Cement Mortar // *International Journal of Advanced Engineering Technology*, vol. 3, no. 3, 2013 (E-ISSN 0976-3945).
10. Nataraja M C, Kumar P G Dileep, Manu A S and M C Sanjay. Use of Granulated Blast Furnace Slag as Fine Aggregate in Cement Mortar // *International Journal of Structural And Civil Engineering Research*. Vol. 2. No. 2. 2013. (ISSN 2319-6009).
11. Sankh, Biradar, Naghathan, Manjunath and Ishwargol. Recent Trends in Replacement of Natural Sand With Different Alternatives. *International Conference on Advances in Engineering & Technology – 2014 (ICAET-2014)*, e-ISSN: 2278-1684, pp. 59-66, p-ISSN: 2320-334X.
12. Gaurav Singh, Souvik Das, Abdullahi Ahmed, Showmen Saha, Somnath Karmakar. Study of Granulated Blast Furnace Slag as Fine Aggregates in Concrete for Sustainable Infrastructure. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. Volume 195, pp. 2272–2279.
13. Murat Kurt, Türkey Kotan, Muhammed Said Gül, Rüstem Gül, Abdulkadir Cüneyt Aydin. The effect of blast furnace slag on the self-compactability of pumice aggregate lightweight concrete. *Sadhana*. February 2016, volume 41, issue 2, pp. 253–264.
14. Khajuria Chetan and Siddique Rafat. Use of Iron Slag as Partial Replacement of Sand to Concrete, *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, volume 3, issue 6, June 2014, ISSN: 2278-7798.
15. Калмыкова Ю.С. Переработка отвальных доменных шлаков с получением шлакощелочных вяжущих // *Экология и промышленность России*. 2014, март. С. 21–25.
16. Игнатова А.М. Исследование возможности использования техногенного сырья к производству волокна и литых заготовок петругическим рециклингом // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2013. №4. С. 141–153.
17. Переработка шлаков на ММК и «Электростали»: [Электронный ресурс] // Аналитический портал химической промышленности. [Newchemistry.ru](http://www.newchemistry.ru). Новые химические технологии. М., 2006–2017. URL: http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n_id=3539. (дата обращения: 24.08.2017).
18. Горбатова Е.А., Емельяненко Е.А., Лебедев А.Н. Влияние вещественного состава шлаков на выбор области их применения // *Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья* (Плаксинские чтения – 2017): материалы Международ. науч. конф., Красноярск, 12–15 сентября 2017 г. Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2017. С. 105–107.
19. МУ НСОММИ № 31. Виды и последовательность минералогических исследований для обеспечения технологических работ.
20. МР НСОММИ № 111. Петрографический анализ магматических, метаморфических и осадочных горных пород.
21. МУ НСАМ № 21. Рентгенографический количественный фазовый анализ (РКФА) с использованием метода внутреннего стандарта.
22. МР НСОММИ № 188. Электронно-микроскопический метод фазового и элементного анализа тонкодисперсных объектов.
23. Osborn E.F., Schairer J.F. *American Journal of Science*. 1941. 239.
24. Тиллер У.А. Затвердевание // *Физическое металловедение*. М.: Мир, 1968. Т.2. С. 155–226.

Поступила 05.10.17.

Принята в печать 23.08.17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-4-31-39>**JUSTIFYING THE INTEGRATION OF MINERALOGICAL ANALYSIS METHODS WHEN STUDYING METALLURGICAL SLAGS**

Elena A. Gorbatova – D.Sc. (Geology and Minerology)

Fedorovsky National Institute of Mineral Resources, Moscow, Russia. E-mail: lena_gorbatova@mail.ru

Elena G. Ozhogina – D.Sc. (Geology and Mineralogy)

Fedorovsky National Institute of Mineral Resources, Moscow, Russia. E-mail: vims-ozhogina@mail.ru

Alexey N. Lebedev – Postgraduate Student

Fedorovsky National Institute of Mineral Resources, Moscow, Russia. E-mail: indoneziyec@mail.ru

Elena A. Yemelyanenko – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Mine Surveying and Minerals Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: emv31@mail.ru

Alexander S. Kharchenko – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University. E-mail: as.mgtu@mail.ru

Valentin N. Selivanov – Ph.D. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University. E-mail: mcm@magtu.ru

Abstract

Problem Statement (Relevance): This article describes the capabilities of an advanced complex of mineralogical analysis methods applied for studying the technical stone. With the help of the complex, one can obtain complete and reliable information on the material composition and the morphostructure of the mineral phases, simulate the mineral formation processes behind the technical stone, analyse the economic needs of the region and predict what areas the technical raw materials are likely to find further application in. Using the example of the blast furnace slag, the authors support the feasibility of integrating the conventional mineralogical methods (such as optical microscopy and quantitative X-ray analysis) with the methods of electron microscopy and X-ray spectroscopy. **Objectives:** This research aims to substantiate the feasibility of integrating mineralogical analysis methods for studying metallurgical slags. **Methods Applied:** A combination of advanced mineralogical analysis methods including optical microscopy (optical petrography and mineralogy), quantitative X-ray analysis, electron microscopy and X-ray spectroscopy. Mineralogical studies are regulated by the guidelines approved by the Council for Mineralogical Research Methods. **Originality:** The originality of this research is in the novel approach to studying the material composition of slags, i.e. using a combination of the mineralogical analysis methods. **Findings:** This article describes the results of the study into blast furnace slags. Due to the optimum combination of methods, the authors were able to carry out a phase analysis of the slags, determine the actual chemical composition of the phases identified and the distribution of the chemical components across the grain plane, study the morphology of the slag-forming mineral phases and their spatial relationships. All that helped identify the sequence and the mechanism of phase formation. **Practical Relevance:** The data obtained provide all the information about the phase composition of the slags in view, as well as the mechanism of how the slags form in the blast furnace hearth.

Keywords: Blast-furnace slag, material composition, man-made mineral raw materials, mineralogical analysis methods, integration, mineral phases, akermanite, oldhamite, skeletal and dendritic crystals.

References

1. Panishev N.V., Bigeev V.A., Galiullina E.S. Processing of metallurgical slags at MMK OJSC. *Metallurgiya*:

tekhnologii, innovatsii, kachestvo [Collection of papers: Metallurgy: Processes, Innovations, Quality]. Ed. by E.V. Protopopov, Novokuznetsk, 2015, pp. 377-379. (In Russ.)

2. Tretyak A.A. Blast furnace production in Russia in 2011-2016. *Metallurgiya chuguna – vyzovy XXI veka. Trudy VIII mezhdunarodnogo kongressa domenshchikov* [Metallurgy of cast iron: Challenges of the XXI century. Proceedings of the VIII International Congress of Blast Furnace Operators]. Moscow: Kodeks Publishing House, 2017, pp. 21–35. (In Russ.)

3. Panishev N.V., Bigeev V.A., Galiullina E.S. Use of the blast furnace dust in the production of composite flux. *V sbornike: Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo* [Collection of papers: Metallurgy: Processes, Innovations, Quality]. Ed. by E.V. Protopopov, 2015, pp. 285–288. (In Russ.)

4. Panishev N.V., Bigeev V.A., Galiullina E.S. Prospective recycling of coal tailings and the solid waste of thermal power plants. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [The theory and technology of metallurgical production], 2015, no. 2 (17), pp. 69–76. (In Russ.)

5. Panishev N.V., Bigeev V.A., Chernyaev A.A., Pantelev A.V. Processing of fine-grained metallurgical waste with the production of granulated cast iron and the extraction of zinc. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [The theory and technology of metallurgical production], 2014, no. 2 (15), pp. 101–105.

6. Panishev N.V., Bigeev V.A., Chernyaev A.A. Processing of fine-grained metallurgical waste with the production of granulated cast iron and the extraction of zinc. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2013, no. 4 (44), pp. 26–29. (In Russ.)

7. Bigeev V.A. et al. *Osnovy metallurgicheskogo proizvodstva: Uchebnik* [Basics of metallurgical production: Textbook]. St. Petersburg: Lan, 2017, 616 p. Available at: <http://e.lanbook.com/book/90165>.

8. Sudarvizhi Meenakshi S, Ilangovan. R, Performance of Copper slag and ferrous slag as partial replacement of sand in Concrete, *International Journal of Civil And Structural Engineering*, volume 1, no. 4, 2011 (ISSN 0976-4399).

9. Jadhav Priyanka A., and Kulkarni Dilip K., Effect of Replacement of Natural Sand By Manufactured Sand on the Properties of Cement Mortar. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, vol. 3, no. 3, 2013 (E-ISSN 0976-3945).

10. Nataraja M C, Kumar P G Dileep, Manu A S and M C Sanjay, Use of Granulated Blast Furnace Slag as Fine Aggregate in Cement Mortar. *International Journal of Structural*

- And Civil Engineering Research, vol. 2, no. 2, 2013. (ISSN 2319-6009).
11. Sankh, Biradar, Naghathan, Manjunath and Ishwargol, Recent Trends in Replacement of Natural Sand With Different Alternatives. International Conference on Advances in Engineering & Technology – 2014 (ICAET-2014), e-ISSN: 2278-1684, pp. 59–66, p-ISSN: 2320-334X.
 12. Gaurav Singh, Souvik Das, Abdullahi Ahmed, Showmen Saha, Somnath Kamakar. Study of Granulated Blast Furnace Slag as Fine Aggregates in Concrete for Sustainable Infrastructure. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Vol. 195, pp. 2272–2279.
 13. Murat Kurt, Türkay Kotan, Muhammed Said Gül, Rüstem Gül, Abdulkadir Cüneyt Aydin. The effect of blast furnace slag on the self-compactability of pumice aggregate lightweight concrete. *Sadhana*. February 2016, vol. 41, iss. 2, pp. 253–264.
 14. Khajuria Chetan and Siddique Rafat, "Use of Iron Slag as Partial Replacement of Sand to Concrete, International Journal of Science", *Engineering and Technology Research (IJSETR)*, vol. 3, iss. 6, June 2014. ISSN: 2278-7798.
 15. Kalmykova Yu.S. Processing of dump blast furnace slag for the production of alkali-activated slag binders. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [The ecology and production industry of Russia], March 2014, pp. 21–25. (In Russ.)
 16. Ignatova A.M. Studying the possibility of using man-made raw materials for the production of fibers and cast billets by way of petrological processing. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzhia* [The Volga Region Bulletin of Science and Technology], 2013, no. 4, pp. 141–153. (In Russ.)
 17. Processing of slags at MMK and Elektrostal. Analytical portal of the chemical industry. *Newchemistry.ru*. New chemical technologies. Moscow, 2006-2017. Available at: http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n_id=3539 (Accessed August 24, 2017).
 18. Gorbatova E.A., Emelyanenko E.A., Lebedev A.N. How the composition of slags determines their applications. Current problems in the processing of complex ores and man-made raw materials (Plaksin readings 2017): Proceedings of the International Science Conference in Krasnoyarsk, September 12th-15th, 2017. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2017, pp. 105–107. (In Russ.)
 19. Guidelines of the Academic Board for Mineralogical Research Methods, no. 31. Types and the order of mineralogical studies to support the operations. (In Russ.)
 20. Guidelines of the Academic Board for Mineralogical Research Methods, no. 111. Petrographic analysis of igneous, metamorphic and sedimentary rocks. (In Russ.)
 21. Guidelines of the Academic Board for Analytical Methods, no. 21. Quantitative phase analysis by X-ray diffraction and using the internal standard method. (In Russ.)
 22. Guidelines of the Academic Board for Mineralogical Research Methods, no. 188. Electron microscopy as part of the phase and element analysis of finely dispersed objects. (In Russ.)
 23. Osborn E.F., Schairer J.F. *American Journal of Science*. 1941, 239.
 24. Tiller U.A. Solidification. *Fisicheskoe metallovedenie* [Physical Metallurgy]. Moscow: Mir, 1968, vol. 2, pp. 155–226.

Received 05/10/17

Accepted 23/08/17

Образец для цитирования

Целесообразность комплексирования минералого-аналитических методов изучения металлургических шлаков / Горбатова Е.А., Ожогина Е.Г., Лебедев А.Н., Емельяненко Е.А., Харченко А.С., Селиванов В.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №4. С. 31–39. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-4-31-39>

For citation

Gorbatova E.A., Ozhogina E.G., Lebedev A.N., Emelyanenko E.A., Kharchenko A.S., Selivanov V.N. Justifying the integration of mineralogical analysis methods when studying metallurgical slags. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 4, pp. 31–39. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-4-31-39>