

УДК: 669.046.582.5

ВЯЗКОСТЬ ТИТАНИСТОГО ШЛАКА РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПЛАВКИ МЕТАЛЛИЗОВАННОЙ СМЕСИ ПЕРОВСКитОВОГО И ИЛЬМЕНИТОВОГО КОНЦЕНТРАТОВ

© 2024 г. А. С. Вусихис¹ *, С. Н. Тюшняков¹, Л. Ю. Удоева¹ **,
С. Н. Агафонов¹, К. В. Пикулин¹

¹Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: vas58@mail.ru

**e-mail: lyuud@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.05.2024

После исправления 25.05.2024

Принята к публикации 30.05.2024

Для оценки возможности совместной переработки ильменитового (FeTiO_3) и перовскитового (CaTiO_3) концентратов, с использованием дуплекс-процесса, включающего твердофазное восстановление железа (металлизацию) и последующую разделительную электроплавку на чугун и титанистый шлак, рассмотрены свойства шлаковых расплавов. Температура начала кристаллизации (температура ликвидуса) и соответствующая ей вязкость титанистого шлака зависят от его химического состава. Увеличение содержания оксидов титана приводит к повышению значений этих свойств, а наличие оксидов железа и кальция — к уменьшению. При совместной переработке ильменитового (ИК) и перовскитового (ПК) концентратов можно регулировать содержание CaO в шлаке изменением их соотношения ПК/ИК, а долю FeO определяет степень металлизации железа в процессе предварительного восстановительного обжига смеси концентратов с углеродным восстановителем. Для выбора оптимального соотношения ПК/ИК определены температурные зависимости вязкости модельных оксидных расплавов системы $\text{TiO}_2\text{—FeO—CaO—Al}_2\text{O}_3\text{—MgO}$, близких по составу шлакам, образующимся в результате плавки смесей перовскитового и ильменитового концентратов в интервале соотношений ПК/ИК, равных $0.6\div 1.4$, и степени металлизации от 75 до 95%.

Согласно полученным результатам, во всем интервале исследованных составов и температур вязкость шлаковых расплавов не превышает 0.8 Па·с. То есть такие шлаки будут достаточно жидкоподвижными на выпуске из плавильного агрегата, если температура расплавов будет выше температуры ликвидуса — начала их кристаллизации. Увеличение соотношения ПК/ИК по мере уменьшения степени металлизации с 95 до 75% ведет к монотонному снижению температуры ликвидуса и соответствующей ей вязкости с 1490 °С и 0.79 Па·с до 1270 °С и 0.17 Па·с соответственно. Рекомендовано использовать шихту, содержащую равные массовые доли концентратов (ПК/ИК равно 1) при расходах углеродного восстановителя в расчете на металлизацию 85% железа. В этом случае шлаки при относительно низком содержании оксида железа (3.1%) будут жидкоте-

кучими (0.38 Па·с) с температурой начала кристаллизации 1400 °С, что позволит вести разделительную плавку при рабочих температурах 1500–1550 °С.

Ключевые слова: перовскит, ильменит, концентрат, плавка, вязкость, температура начала кристаллизации.

DOI: 10.31857/S0235010624040075

ВВЕДЕНИЕ

Ильменитовая руда является одним из основных сырьевых источников титанового производства. На ильменит приходится более 90% мировых запасов титана [1], из которого менее 5% идет на производство металлического титана и его сплавов, а остальное — на получение пигментного диоксида титана [2]. Для переработки ильменита используют как гидро-, так и пирометаллургические процессы.

Прямое выщелачивание используют преимущественно в технологии богатых ильменитовых руд, обеспечивая производство достаточно высококачественного пигмента TiO_2 при низких энергетических затратах. В основе этих методов лежит разложение ильменита минеральными кислотами [3], к примеру серной [4, 5] и соляной [6], либо щелочами [7] с извлечением до 95% титана в виде диоксида с возможностью его переработки на пигмент или титановую губку. Недостатками процессов являются низкая производительность, большой расход кислот и, как следствие, высокие материальные затраты, низкая экологичность процессов, большие потери железа с растворами, которые требуют утилизации либо захоронения, а также высокие требования к чистоте исходного сырья. Для ускорения выщелачивания используют способы Benelite, Ishihara, Murso, Austrac, Becher, предусматривающие предварительный окислительный или восстановительный обжиг ильменита [8].

Пирометаллургический процесс — распространенная схема извлечения титана из ильменитовых концентратов [9]. По схеме, реализованной в ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» [10], ильменит в смеси с углем плавят в высокотемпературных электрических печах закрытого типа, используемых обычно при производстве ферросплавов. При высоких температурах железо восстанавливают до металла с образованием чугуна, а TiO_2 переходит в шлак. Получаемый шлак используют для производства титана в виде металла и сплавов, диоксида, карбида и других соединений. Извлечение титана в шлак составляет около 95%. Достоинствами данного способа являются возможность получения титанистого шлака из бедного сырья, а также извлечение железа в товарный продукт (чугун). Основной недостаток способа — большое энергопотребление. Дуплекс-процесс, реализованный в г. Сорель-Трейси (Канада), предусматривает предварительное твердофазное восстановление железа во вращающейся печи без восстановления титана и разделение металлической и шлаковой фазы в электропечи [11]. Металлизированный концентрат загружается в электропечь в горячем виде, что позволяет снизить энергозатраты. Для повышения эффективности карботермического процесса предложено предварительное окисление ильменитовых концентратов [12–14], а также использование активированного восстановителя — углерода [15].

Физико-химические свойства высокотитанистых шлаков (TiO_2 более 40%) оказывают существенное влияние на режим электроплавки ильменитовых

концентратов [16–18]. Полнота разделения образующихся при плавке чугуна и шлака определяется вязкостью, а температура процесса – началом кристаллизации последнего.

Известно [19–21], что в таких шлаках титан находится в четырехвалентном состоянии и существует преимущественно в форме аниона $(\text{TiO}_6)^{8-}$, который, являясь единицей вязкого течения, обуславливает их низкую вязкость (менее 0.5–0.7 Па·с). Эти шлаки тугоплавки и при охлаждении расплава имеют короткий температурный интервал затвердевания. Увеличение содержания TiO_2 повышает температуру начала кристаллизации шлака. Наличие оксидов титана с низкой валентностью (Ti_2O_3 , Ti_3O_4 , Ti_4O_5 и др.) влияет аналогично и в большей степени. Присутствие оксидов железа и кальция, наоборот, снижает как температуру ликвидуса, так и вязкость шлаков. Следовательно, при проведении плавки без флюсов для реализации процесса карботермического восстановления ильменита необходима температура выше 1600 °С, а добавлением оксида кальция рабочую температуру можно снизить до 1450–1550 °С.

Регулировать содержание оксидов титана и железа в титанистых шлаках можно изменением температуры процесса и расходом восстановителя – углерода. Источником оксида кальция может быть перовскитовый концентрат, основой которого является минерал перовскит (CaTiO_3) [22].

Цель настоящей работы заключалась в оценке влияния соотношения ПК/ИК в исходном шихтовом материале и степени металлизации продуктов восстановления на вязкость и температуру начала кристаллизации титанистого шлака, образующегося в результате дуплекс-процесса – твердофазного восстановления и разделительной электроплавки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вязкость модельных оксидных расплавов системы $\text{TiO}_2\text{--FeO--CaO--Al}_2\text{O}_3\text{--MgO}$, близких по составу шлакам, образующимся при плавке смеси перовскитового и ильменитового концентратов в интервале соотношений 0.6÷1.4 и твердофазной металлизации железа от 75 до 95%, измеряли с помощью вибрационного вискозиметра, работающего в режиме резонансных колебаний [23, 24] по методике, описанной в работах [25, 26], с фиксацией температуры расплава вольфрам-рениевой термопарой при охлаждении со скоростью 5÷7 град/мин и последующей компьютерной обработкой полученных данных.

Модельные шлаки для исследования готовили из чистых оксидов, смеси брикетировали в таблетки, которые помещали в молибденовый тигель, нагревали в электропечи сопротивления до 1660 °С и измеряли вязкость.

Для получения искомых закономерностей измерения проводили по ортогональному плану двухфакторного эксперимента на трех уровнях 2^3 [27]. В качестве первого фактора для расчета химического состава модельных шлаков приняли массовое соотношение концентратов (ПК/ИК) в исходной смеси, второй фактор – степень восстановления из нее железа, то есть степень металлизации ($\phi_{\text{мет}}$). План проведения эксперимента приведен в табл. 1.

Соотношение компонентов в модельных шлаках рассчитывали следующим образом. Используя приведенные к 100% по содержанию FeO, TiO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 ,

СаО составы реальных проб ильменитового и перовскитового концентратов (табл.2), исследованных в работе [28], находили химический состав смесей концентратов при заданном соотношении ПК/ИК в интервале изменений 0.6÷1.4. Далее, в зависимости от степени восстановления железа $\varphi_{мет}$, изменяющегося от 75 до 95%, рассчитывали долю каждого компонента в шлаках, образующихся в процессе карботермического восстановления смесей концентратов (табл. 3).

Таблица 1. План проведения эксперимента

Фактор	Номер опыта								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ПК/ИК, ед.	0.6	1.0	1.4	0.6	1.0	1.4	0.6	1.0	1.4
$\varphi_{мет}$, %	95	95	95	85	85	85	75	75	75

Таблица 2. Химический состав ильменитового и перовскитового концентратов

Материал	Содержание основных компонентов, мас. %								
	TiO ₂	Fe _{общ.}	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	CeO ₂	SiO ₂	Nb ₂ O ₅
Ильменитовый концентрат	69.11	18.90	2.89	0.18	0.36	0.88	—	1.92	—
Перовскитовый концентрат	34.66	7.23	1.34	23.49	2.77	—	0.60	11.23	1.16

Таблица 3. Приведенные составы ИК, ПК и расчетные составы модельных шлаков

Объект	Содержание, мас. %				
	FeO	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
ПК	24.63	69.97	1.92	2.93	0.18
ИК	21.87	36.97	11.73	1.43	25.05
Шлак №1	1.16	70.51	7.61	5.89	13.03
Шлак №2	1.04	65.21	9.19	5.40	16.95
Шлак №3	0.97	61.79	10.21	5.08	19.48
Шлак №4	3.41	68.91	7.44	5.75	12.73
Шлак №5	3.07	63.87	9.00	5.29	16.60
Шлак №6	2.85	60.61	10.01	4.99	19.11
Шлак №7	5.55	67.38	7.27	5.63	12.45
Шлак №8	5.01	62.59	8.82	5.18	16.27
Шлак №9	4.66	59.48	9.83	4.89	18.75

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования свойств расплавов модельных шлаков в заданных интервалах соотношения ПК/ИК ($0.6 \div 1.4$) и степени металлизации концентратов (75–95%) показали, что на графических зависимостях вязкости от температуры (рис. 1) выделяются два характерных участка: в высокотемпературной области снижение температуры сопровождается довольно интенсивным увеличением вязкости, а при дальнейшем охлаждении расплава, вплоть до температуры начала кристаллизации, ее влияние становится не столь значительным.

Обработка результатов экспериментов (табл. 4) с помощью программы STATISTICA позволила определить аналитический вид закономерности изменения температуры ликвидуса модельных титанистых шлаков $t_{\text{л}}$ ($^{\circ}\text{C}$) и соответствующей ей вязкости шлака $\eta_{\text{л}}$ (Па·с) в зависимости от соотношения ПК/ИК и степени металлизации смеси концентратов, а также рассчитать уравнения регрессии, которые описывают поведение функций отклика – вязкости и температуры ликвидуса, в зависимости от основных факторов.

На рис. 2 представлен вид функций отклика – вязкости шлака (рис. 2а) и температуры ликвидуса (рис. 2б), которой она соответствует, в зависимости от соотношения ПК/ИК и степени металлизации смеси концентратов $\Phi_{\text{мет}}$.

На рис. 3 представлены изолинии вязкости шлака (рис. 3а) и температуры ликвидуса, которой она соответствует (рис. 3б), в зависимости от соотношения ПК/ИК и степени металлизации смеси концентратов.

Анализ полученных двухфакторных закономерностей (рис. 2 и 3) показал, что максимальная температура ликвидуса (1490°C) и соответствующая ей вязкость

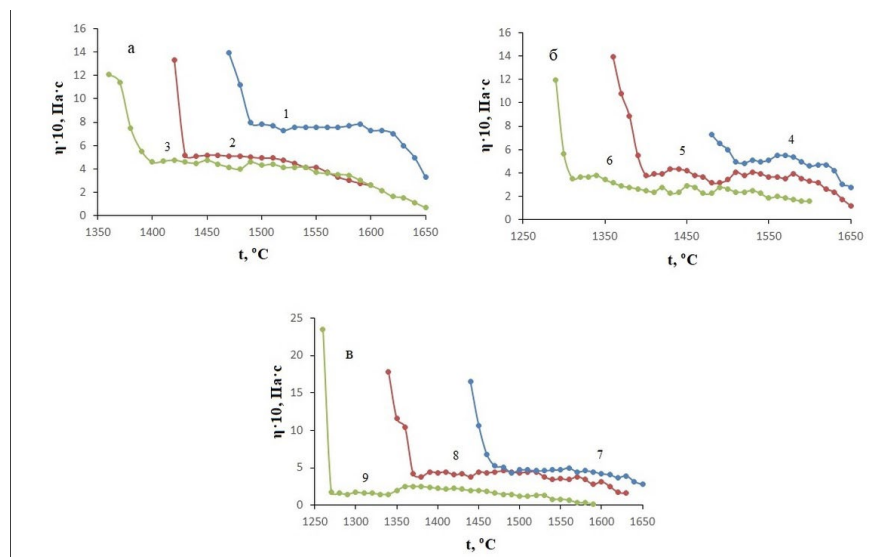


Рис. 1. Температурные зависимости изменения вязкости шлаков различного состава в соответствии с планом эксперимента (табл. 1): а – опыты 1–3; б – опыты 4–6; в – опыты 7–9.

Таблица 4. Результаты эксперимента

Свойство шлака	Номер опыта								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_{\text{л}}, ^\circ\text{C}$	1490	1430	1400	1510	1400	1310	1480	1370	1270
$\eta_{\text{л}}, \text{Па}\cdot\text{с}$	0.79	0.52	0.46	0.50	0.38	0.35	0.52	0.42	0.17

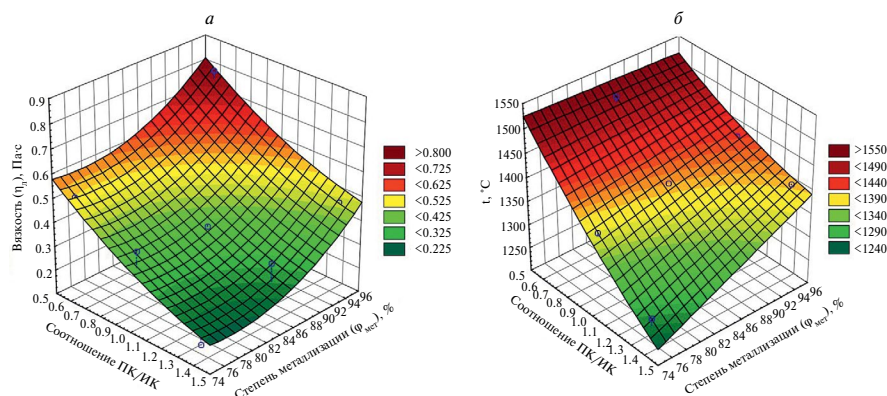


Рис. 2. Вид функций отклика — вязкости шлака *a* и температуры ликвидуса, которой она соответствует *б*, в зависимости от соотношения ПК/ИК и степени металлизации смеси концентратов.

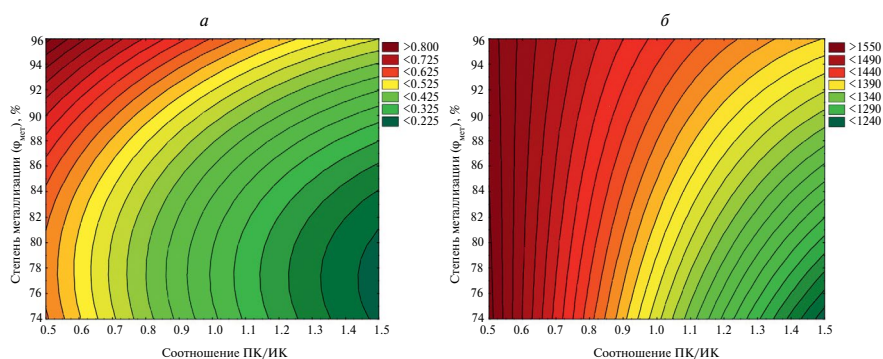


Рис. 3. Изолинии вязкости шлака *a* и температуры ликвидуса, которой она соответствует *б*, в зависимости от соотношения ПК/ИК и степени металлизации смеси концентратов.

(0.79 Па·с) шлака могут быть получены в результате разделительной плавки восстановленной до 95% смеси концентратов с соотношением ПК/ИК, равным 0.6. В состав этого шлака переходит максимальное количество оксида титана (70.5%) и минимальное — оксидов железа (1.2%) и кальция (13.0%). С увеличением соотношения ПК/ИК до 1.4 ед. и снижением степени металлизации смеси

концентратов до 75% температура ликвидуса и соответствующая ей вязкость стремятся к минимуму ($t_{\text{л}} = 1270$ °С, $\eta_{\text{л}} = 0.17$ Па·с), а полученный при разделительной плавке шлак становится беднее по титану при повышении содержания оксидов железа (4.7%) и кальция (18.0%).

Уравнения регрессии, которые описывают поведение функций отклика, имеют следующий вид:

$$\eta_{\text{л}} (\text{Па}\cdot\text{с}) = 5.3437 - 0.8003x - 0.1141y + 0.1741x^2 + 0.0012xy + 0.0007y^2 \quad (1)$$

$$t_{\text{л}} (\text{°С}) = 2025 - 970.8333x - 4.1667y + 62.5x^2 + 7.5xy - 3.4983 \cdot 10^{-13}y^2; \quad (2)$$

где x — соотношение ПК/ИК, ед., а y — степень металлизации, мас. %.

Для проверки адекватности расчетной модели, описанной уравнением регрессии, выполнено сопоставление экспериментальных и расчетных значений вязкости и температуры ликвидуса. Сравнение методом корреляционного анализа результатов прямых измерений и прогнозных расчетов, представленных на рис. 4, показало, что практически все экспериментальные данные располагаются в доверительном интервале, ограниченном эллипсом надежности критерия.

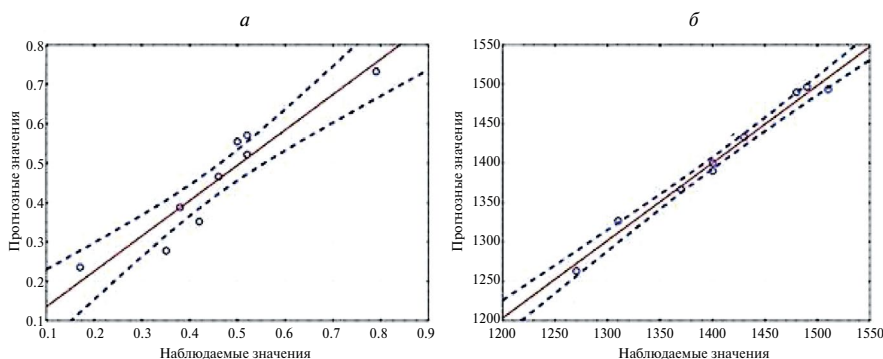


Рис. 4. Диаграмма корреляции экспериментальных (точки) и расчетных (линии) значений свойств исследованных шлаков: *a* — вязкости $\eta_{\text{л}}$, Па·с; *б* — температуры ликвидуса $t_{\text{л}}$, °С.

Проведенные исследования по оценке возможности использования перовскитового концентрата как источника оксида кальция для получения высокотитанистого шлака, пригодного для производства пигментного диоксида титана [18], дали положительный результат. Все рассмотренные составы шлаков в расплавленном состоянии обладают относительно низкой вязкостью (менее 0.8 Па·с). На выпуске разделительной плавки такие шлаки будут в достаточной степени жидкотекучими, но из-за короткого интервала затвердевания их состав следует подбирать таким образом, чтобы температура расплава была достаточной для того, чтобы не происходило кристаллизации шлака. При этом температура шлака должна быть ниже температуры металлического расплава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при совместной переработке ильменитовых и перовскитовых концентратов на высокотитанистые шлаки можно ориентироваться на следующие рекомендации. На первой стадии смесь концентратов совместно с твердым углеродсодержащим реагентом следует обжигать при температуре и расходом восстановителя, обеспечивающим максимальное извлечение железа в металл при минимальном восстановлении титана до низших оксидов. Температура плавления металла (чугуна) будет зависеть от содержания в нем углерода, то есть от количества восстановителя в исходной шихте. Соотношением ПК/ИК в смеси концентратов можно регулировать состав шлака и получать требуемую температуру начала его кристаллизации.

Шлаки, полученные в результате плавки смеси концентратов с соотношением ПК/ИК, равным 1, предварительно металлизированной на 85%, при относительно небольшом содержании оксида железа (3.1%) будут жидкотекучими (0.38 Па·с), с температурой начала кристаллизации 1400 °С, что позволит проводить вторую стадию дуплекс-процесса – разделительную плавку, при температуре 1500–1550 °С.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена по государственному заданию ИМЕТ УрО РАН (№ госрегистрации темы 122020100404-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Perks C., Mudd G. A detailed assessment of global Zr and Ti production // *Miner Econ.* 2021. **34**. P. 345–370.
2. Zhang W., Zhu Z., Cheng C. Y. A literature review of titanium metallurgical processes // *Hydrometallurgy*. 2011. **108**. P. 177–188.
3. Парфенов О.Г., Пашков Г.А. Проблемы современной металлургии титана. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2008.
4. Welham N.J., Llewellyn D.J. Mechanical enhancement of the dissolution of ilmenite // *Minerals Engineering*. 1998. **11**. №9. P. 827–841.
5. Jia L., Liang B., Lü L., Yuan S., Zheng L., Wang X., Li C. Beneficiation of titania by sulfuric acid pressure leaching of Panzhihua ilmenite // *Hydrometallurgy*. 2014. **150**. P. 92–98.
6. Ogasawara T., Veloso de Araujo R.V. Hydrochloric acid leaching of a pre-reduced Brazilian ilmenite concentrate in an autoclave // *Hydrometallurgy*. 2000. **56**. P. 203–216.
7. Nayl A.A., Awwad N.S., Aly H.F. Kinetics of acid leaching of ilmenite decomposed by KOH: Part 2. Leaching by H_2SO_4 and $C_2H_2O_4$ // *Journal of hazardous materials*. 2009. **168**. № 2–3. P. 793–799.
8. Phung T.T., Nguyen N.P. (2021). Becher Method Application for Ilmenite Concentrates of Vietnam. In: Bui, XN., Lee, C., Drebenstedt, C. (eds) / *Proceedings of the International Conference on Innovations for Sustainable and Responsible Mining. Lecture Notes in Civil Engineering*. **109**. Springer, Cham.
9. Леонтьев Л.И., Ваголин Н.А., Шаврин С.Л., Шумаков Н.С. Пирометаллургическая переработка комплексных руд. М.: Металлургия, 1997.
10. Занавескин К.Л., Черезова Л.А., Бурмакина О.В. Повышение эффективности комплексной переработки ильменитовых концентратов / Проблемы геологии и

- освоения недр. Труды XXI Межд. симпозиума им. академика М.А. Усова. Томск: НИТПУ. 2017. С. 388–389.
11. Стариков А.И., Ведешкин М.В., Монетов Г.В. Мировой и отечественный опыт переработки титаносодержащего железорудного сырья. Проблемы комплексной переработки титаномагнетитов Южного Урала. Магнитогорск: Дом печати. 2001. С. 35–47.
 12. Lv W., Lv X., Xiang J., Wang J., Lv X., Bai C., Song B. Effect of pre-oxidation on the carbothermic reduction of ilmenite concentrate powder // *International Journal of Mineral Processing*. 2017. **169**. P. 176–184.
 13. Mehdilo A., Irannajad M. Comparison of microwave irradiation and oxidation roasting as pretreatment methods for modification of ilmenite physicochemical properties // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2016. **33**. P. 59–72.
 14. Gou H.P., Zhang G.H., Chou K.C. Influence of pre-oxidation on carbothermic reduction process of ilmenite concentrate // *ISIJ International*. 2015. **55**. № 5. P. 928–933.
 15. Gou H.-P., Zhang G.-H., Hu X.-J., Chou K.-Ch. Kinetic study on carbothermic reduction of ilmenite with activated carbon // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2017. **27**. № 8. P. 1856–1861.
 16. Резниченко В.А. Электротермия титановых руд. М.: Наука. 1969.
 17. Васютинский Н.А. Титановые шлаки. М.: Металлургия. 1972.
 18. Резниченко В.А., Устинов В.С., Карязин И.А. и др. Электрометаллургия и химия титана. М.: Наука. 1982.
 19. Slag atlas. 2nd Edition. Düsseldorf: Verlag Stahlissen GmbH. 1995.
 20. Асанов А.В., Анонкин И.В., Мальков Н.В. и др. Влияние химического состава и температуры на вязкость высокотитанистых шлаков // *Вестник ЮрГУ*. 2008. № 9. С. 7–9.
 21. Zhang S., Wang Z., Zhanga J., Guo P., Jiang D., Si R. Effect of TiO_2 and FeO on viscosity and structure of HImelt titanium-containing slag Shushi // *Ceramics International*. 2024. **50**. № 1. Part A. P. 791–798.
 22. Николаев А.И., Герасимова Л.Г., Петров В.Б., Майоров В.Г. Перовскитовый концентрат — перспективное нетрадиционное сырье для производства титановой и редкометаллической продукции // *Комплексное использование минерального сырья (КИМС)*. 2015. № 2. С. 26–34.
 23. Штенгельмейер С.В., Прусов В.А., Бочегов В.А. Усовершенствование методики измерения вязкости вибрационным вискозиметром // *Заводская лаборатория*. 1985. **51**. № 9. С. 56–57.
 24. Арсентьев П.П., Яковлев В.В., Крашенинников М.Г. Физико-химические методы исследования металлургических процессов. М.: Металлургия. 1988.
 25. Selivanov E.N., Gulyaeva R.I., Istomin S.A., Belyaev V., Tyushnyakov S., Bykov A. Viscosity and thermal properties of slag in the process of autogenous smelting of copper–zinc concentrates // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2015. **124**. № 2. P. 88–95.
 26. Vusikhis A.S., Selivanov E.N., Dmitriev A.N., Chentsov V.P., Ryabov V.V. Structure sensitive properties of system B_2O_3 – CaO melts // *Defect and Diffusion Forum*. 2020. **400**. P. 186–192.
 27. Куприенко Н.В., Пономарева О.А., Тихонов Д.В. Статистика. Методы анализа распределений. Выборочное наблюдение.: Учеб. пособие. 3-е изд. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2009.

28. Федоров С.А., Удоева Л.Ю., Пикулин К.В., Вусихис А.С., Черепанова Л.А. Совместная переработка перовскитового и ильменитового концентратов. Сообщение 1. Химико-минералогическая (вещественная) характеристика перовскитового и ильменитового концентратов // Известия вузов. Черная металлургия. 2024. 67. № 1. С. 27–36.

VISCOSITY OF TITANIUM SLAG IN SEPARATING ELECTRIC MELTING OF A METALLIZED MIXTURE OF PEROVSKITE AND ILMENITE CONCENTRATES

A. S. Vusikhis¹ *, S. N. Tyushnyakov¹, L. Y. Udоеva¹ **, S. N. Agafonov¹,
K. V. Pikulin¹

¹*Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russia*

**e-mail: vas58@mail.ru*

***e-mail: lyuud@yandex.ru*

To assess the possibility of joint processing of ilmenite (FeTiO_3) and perovskite (CaTiO_3) concentrates using a duplex process involving solid-phase reduction of iron (metallization) and subsequent separating melting into pig iron and titanium slag, the properties of slag melts were studied. The crystallization beginning point (liquidus temperature) and the corresponding viscosity of titanium slag depend on its chemical composition. The increase in titanium oxides content results in increase of these properties, while the presence of iron and calcium oxides leads to their decrease. During the joint processing of ilmenite (IC) and perovskite (PC) concentrates, the CaO content in the slag can be adjusted by changing their PC/IC ratio, and the FeO fraction is determined by the degree of iron metallization during the preliminary reduction roasting of a concentrate mixture with a carbon reducing agent. To select the optimal PC/IC ratio the temperature dependences of the viscosity of model oxide melts of the $\text{TiO}_2\text{--FeO--CaO--Al}_2\text{O}_3\text{--MgO}$ system, similar in composition to the slags formed as a result of melting mixtures of perovskite and ilmenite concentrates within the range of PC/IC ratios equaling to $0.6\div 1.4$, and the metallization degree from 75 to 95% were determined.

According to the results obtained, within the entire range of studied compositions and temperatures, the viscosity of slag melts does not exceed 0.8 Pa·s. That is to say, such slags will be sufficiently fluid at the tapping point if the melt temperature is higher than liquidus temperature — the crystallization beginning point. Increasing the PC/IC ratios when decreasing the metallization from 95 to 75%, results in a monotonous decrease in liquidus temperature and its corresponding viscosity from 1490 °C and 0.79 Pa·s up to 1270 °C and 0.17 Pa·s, respectively. It is recommended to use a charge containing equal mass fractions of concentrates (PC/IC equal to 1) at the consumption of carbon reducing agent based on metallization of 85% iron. In this case, slags with a relatively low iron oxide content (3.1%) will be fluid (0.38 Pa·s), and have liquidus temperature of 1400 °C which will allow carrying out top and bottom melt at operating temperatures of 1500–1550 °C.

Keywords: perovskite, ilmenite, concentrate, melt, viscosity, liquidus temperature.

REFERENCES

1. Perks C., Mudd G. A detailed assessment of global Zr and Ti production // *Miner Econ.* 2021. **34**. P. 345–370.
2. Zhang W., Zhu Z., Cheng C. Y. A literature review of titanium metallurgical processes // *Hydrometallurgy*. 2011. **108**. P. 177–188.
3. Parfenov O.G., Pashkov G.A. Problemy sovremennoj metallurgii titana [Problems of modern titanium metallurgy]. Novosibirsk: Siberian Branch of the RAS Publ. 2008. [In Russian].
4. Welham N. J., Llewellyn D. J. Mechanical enhancement of the dissolution of ilmenite // *Minerals Engineering*. 1998. **11**. №9. P. 827–841.
5. Jia L., Liang B., Lü L., Yuan S., Zheng L., Wang X., Li C. Beneficiation of titania by sulfuric acid pressure leaching of Panzhihua ilmenite // *Hydrometallurgy*. 2014. **150**. P. 92–98.
6. Ogasawara T., Veloso de Araujo R.V. Hydrochloric acid leaching of a pre-reduced Brazilian ilmenite concentrate in an autoclave // *Hydrometallurgy*. 2000. **56**. P. 203–216.
7. Nayl A. A., Awwad N. S., Aly H. F. Kinetics of acid leaching of ilmenite decomposed by KOH: Part 2. Leaching by H_2SO_4 and $C_2H_2O_4$ // *Journal of hazardous materials*. 2009. **168**. № 2–3. P. 793–799.
8. Phung T.T., Nguyen N.P. (2021). Becher Method Application for Ilmenite Concentrates of Vietnam. In: Bui, XN., Lee, C., Drebenstedt, C. (eds) / *Proceedings of the International Conference on Innovations for Sustainable and Responsible Mining. Lecture Notes in Civil Engineering*. **109**. Springer, Cham.
9. Leont'ev L.I., Vatolin N.A., Shavrin S.L., Shumakov N.S. Pirometallurgicheskaya pererabotka kompleksnyh rud [Pyrometallurgical processing of complex ores]. Moscow: Metallurgy Publ. 1997. [In Russian]
10. Zanaevskiy K.L., Cherezova L.A., Burmakina O.V. Povysheniye effektivnosti kompleksnoy pererabotki il'menitovykh kontsentratsiy [Increasing the efficiency of complex processing of ilmenite concentrates] / *Problems of geology and subsoil development. Proceedings of the XXI Int. Symposium named after Academician M.A. Usov*. Tomsk: National Research Tomsk Polytech. Univ. Publ. 2017. P. 388–389. [In Russian].
11. Starikov A. I., Vedeshkin M. V., Monetov G. V. Mirovoy i otechestvennyy opyt pererabotki titansoderzhashchego zhelezorudnogo syr'ya. Problemy kompleksnoy pererabotki titanomagnetitov Yuzhnogo Urala [World and domestic experience in processing titanium-containing iron ore raw materials] / *Problems of complex processing of titanomagnetites of the Southern Urals. Magnitogorsk: Dom pechati Publ.* 2001. P. 35–47. [In Russian].
12. Lv W., Lv X., Xiang J., Wang J., Lv X., Bai C., Song B. Effect of pre-oxidation on the carbothermic reduction of ilmenite concentrate powder // *International Journal of Mineral Processing*. 2017. **169**. P. 176–184.
13. Mehdilo A., Irannajad M. Comparison of microwave irradiation and oxidation roasting as pretreatment methods for modification of ilmenite physicochemical properties // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2016. **33**. P. 59–72.
14. Gou H.P., Zhang G.H., Chou K.C. Influence of pre-oxidation on carbothermic reduction process of ilmenite concentrate // *ISIJ International*. 2015. **55**. № 5. P. 928–933.
15. Gou H.-P., Zhang G.-H., Hu X.-J., Chou K.-Ch. Kinetic study on carbothermic reduction of ilmenite with activated carbon // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2017. **27**. № 8. P. 1856–1861.
16. Reznichenko V.A. Elektrotermiya titanovykh rud [Electrothermy of titanium ores.]. Moscow: Nauka Publ. 1969. [In Russian].
17. Vasyutinskij N.A. Titanovye shlaki [Titanium slags]. Moscow: Metallurgiya Publ. 1972. [In Russian].
18. Reznichenko V.A., Ustinov V.S., Karyazin I.A. and etc. Elektrometallurgiya i himiya titana [Electrometallurgy and chemistry of titanium]. Moscow: Nauka Publ. 1982. [In Russian].

19. Slag atlas. 2nd Edition. Düsseldorf: Verlag Stahlisssen GmbH. 1995.
20. Asanov A.V., Anonkin I.V., Mal'kov N.V. and etc. Vliyaniye khimicheskogo sostava i temperatury na vyazkost' vysokotitanistykh shlakov [The influence of chemical composition and temperature on the viscosity of high-titanium slags] // Bulletin of South Ural State University. 2008. № 9. P. 7–9. [In Russian].
21. Zhang S., Wang Z., Zhanga J., Guo P., Jiang D., Si R. Effect of TiO_2 and FeO on viscosity and structure of HIs melt titanium-containing slag Shushi // Ceramics International. 2024. **50**. № 1. Part A. P. 791–798.
22. Nikolaev A. I., Gerasimova L.G., Petrov V.B., Majorov V.G. Perovskitovyy kontsentratsiya — perspektivnoye netraditsionnoye syr'ye dlya proizvodstva titanovoy i redkometall'noy produktsii [Perovskite concentrate is a promising non-traditional raw material for the production of titanium and rare metal products] // Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya (KIMS) [Complex Use of Mineral Resources (CUMR)]. 2015. № 2. P. 26–34. [In Russian].
23. Shtengel'mejer S.V., Prusov V.A., Bohegov V.A. Uovershenstvovaniye metodiki izmereniya vyazkosti vibratsionnym viskozimetrom [Improvement of viscosity measurement method with a vibration viscometer] // Zavodskaya laboratoriya [Industrial Laboratory]. 1985. **51**. № 9. P. 56–57. [In Russian].
24. Arsent'ev P.P., Yakovlev V.V., Krashennnikov M.G. Fiziko-himicheskie metody issledovaniya metallurgicheskikh processov [Physico-chemical methods for studying of metallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya Publ. 1988. [In Russian].
25. Selivanov E.N., Gulyaeva R.I., Istomin S.A., Belyaev V., Tyushnyakov S., Bykov A. Viscosity and thermal properties of slag in the process of autogenous smelting of copper–zinc concentrates // Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 2015. **124**. № 2. P. 88–95.
26. Vusikhis A.S., Selivanov E.N., Dmitriev A.N., Chentsov V.P., Ryabov V.V. Structure sensitive properties of system B_2O_3 –CaO melts // Defect and Diffusion Forum. 2020. **400**. P. 186–192.
27. Kuprienko N.V., Ponomareva O.A., Tikhonov D.V. Statistika. Metody analiza raspredeleniy. Vyborochnoye nablyudeniye. [Statistics. Methods for analyzing distributions. Selective observation]. 3rd ed.: textbook. St.Petersburg: Polytechnic. Univ. Publ. 2009. [In Russian].
28. Fedorov S.A., Udova L.Yu., Pikulin K.V., Vusikhis A.S., Cherepanova L.A. Sovmestnaya pererabotka perovskitovogo i il'menitovogo kontsentratsiy. Soobshcheniye 1. Khimiko-mineralogicheskaya (veshchestvennaya) kharakteristika perovskitovogo i il'menitovogo kontsentratsiy [Joint processing of perovskite and ilmenite concentrates. Message 1. Chemical-mineralogical (material) characteristics of perovskite and ilmenite concentrates] // Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya [Izvestiya. Ferrous metallurgy]. 2024. **67**. № 1. C. 27–36. [In Russian].