

УДК 669.162:669.2/8

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ СОВМЕСТНОЙ УТИЛИЗАЦИИ КРАСНЫХ ШЛАМОВ И ПРОКАТНОЙ ОКАЛИНЫ

© 2022 г. Л. И. Леонтьев^a, Ю. А. Чесноков^{a, *}, И. Н. Танутров^a,
М. Н. Свиридова^a, Л. А. Маршук^a

^aИнститут металлургии Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: garlics@list.ru

Поступила в редакцию 23.01.2022 г.

После доработки 28.01.2022 г.

Принята к публикации 03.02.2022 г.

В результате проведенных экспериментальных исследований получены пробы окучкованных продуктов методами окислительного обжига, глубокой металлизации и прессования. Изучены физико-химические и металлургические свойства объектов исследования, существенно влияющих на технико-экономические показатели последующей технологии промышленной переработки. Исходные материалы получены гидрометаллургическим способом при совместном выщелачивании отходов производства алюминия (красные шламы) и трубопрокатного производства (замасленной окалины). В лабораторных условиях из наработанной опытной партии железорудного концентрата получены различные типы окучкованных продуктов, в том числе окисленные и рудоугольные окатыши, брикеты с различными химическим составом и заданным соотношением основности CaO/SiO_2 . Определены основные технологические параметры окучкования и термообработки для получения заданных характеристик для данного типа железорудного сырья. Исследованы основные стандартизированные металлургические характеристики полученных материалов, такие как восстановимость по ГОСТ 17212–84, прочность при высокотемпературной обработке по ISO 13930–1998, а также температуры начала и конца размягчения материалов по ГОСТ 26517–85 с целью дальнейшего математического моделирования и сравнительного анализа технико-экономических показателей в различных металлургических агрегатах при обосновании выбора оптимальных параметров для различных технологических схем переработки данного типа железорудного сырья. Изучен рентгенофазовый состав исходного сырья и продуктов переработки, а также выявлены основные структурные составляющие исследуемых материалов, полученных при совместной утилизации красных шламов и прокатной окалины. Разработана методика расчета температуры кристаллизации и вязкости шлаков на основе тройных и четверных диаграмм состояния $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ для оперативного анализа и контроля структурно-чувствительных свойств окисных систем. Выполнена программная реализация расчета по предложенным методикам в электронных таблицах MS Excel.

Ключевые слова: утилизация, красный шлам, замасленная прокатная окалина, выщелачивание, доменный процесс, технологическая схема

DOI: 10.31857/S0235010622030069

ВВЕДЕНИЕ

Одним из существенных направлений решения вопросов охраны окружающей среды от вредного воздействия промышленных отходов является разработка и внедрение в практику комплексных и безотходных технологических схем. С этой точки зрения

Таблица 1. Исходный химический состав концентрата (КШ + ЗПО), мас. %

Fe _{общ}	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO
56.74	54.06	24.29	5.74	0.74	3.65	1.47	5.61	0.46
V ₂ O ₅	NiO	Cr ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CuO	CoO	P ₂ O ₅	SO ₃
0.04	0.12	0.00	1.45	0.09	0.11	0.10	1.46	0.61

Таблица 2. Химический состав нефлюсованных (ОНФ) и офлюсованных (ОФ) окатышей, мас. %

Окатыши	Fe _{общ}	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO
ОНФ	55.31	76.24	2.5	5.61	0.75	3.95	1.44	5.61	0.30
ОФ	53.85	74.15	2.5	8.09	0.75	3.85	1.40	5.47	0.29
Окатыши	V ₂ O ₅	NiO	Cr ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CuO	CoO	P ₂ O ₅	SO ₃
ОНФ	0.04	0.10	0.11	1.46	0.04	0.11	0.10	1.32	0.12
ОФ	0.03	0.09	0.10	1.16	0.03	0.08	0.08	1.26	0.11

совместное использование отходов алюминиевой промышленности и прокатного производства – красных шламов (КШ) и замасленной прокатной окалины (ЗПО) можно рассматривать как дополнительный источник железорудного сырья в черной металлургии. Настоящая статья является продолжением исследований, в которых рассматривались вопросы получения гидromеталлургическим способом коллективного железорудного концентрата из отходов глиноземного и прокатного производств [1, 2]. В данной работе рассматриваются варианты получения окускованного сырья с заданными по составу характеристиками и сравнительная оценка их металлургических свойств применительно к пирометаллургической переработке в области черной металлургии.

Согласно предварительной оценке [2] в лабораторных условиях из замасленной прокатной окалины и концентрата смеси красных шламов, были получены окатыши естественной основности и офлюсованные известняком, химический состав которого приведен в табл. 1. В состав связки окатышей входил бентонит (0.7% от общей массы), обжиг проводили при температуре 1200°C. Для обеспечения офлюсования окатышей до степени CaO/SiO₂ ≈ 2.10 использовался обычный известняк подготовленной крупности, влажность концентрата – 9%. Режим окомкования и термообработки (сушка, нагрев, обжиг и охлаждение) исходных проб соответствовал типичным условиям промышленного производства на обжиговых машинах. Химический состав полученных окатышей представлен в табл. 2.

Анализ показывает, что в результате окислительного обжига в полученном окускованном сырье существенно снизилось содержание вредных примесей, в том числе серы (с 0.61 до 0.11–0.12%). Тем не менее, содержание пентаоксида фосфора, осталось на достаточно высоком уровне – 1.26–1.32%.

Также для исследования процесса переработки металлизированного сырья из исследуемого концентрата были получены рудоугольные окатыши (ОМ) естественной основности. Окомкованные рудоугольные гранулы, влажностью 8.5% обжигали в окислительной атмосфере при 1200–1220°C. В качестве связки использовали бентонит (0.7% по массе). Заданная конечная основность окатышей колебалась в пределах CaO/SiO₂ ≈ 1.12–1.15. Исходный и конечный состав полученных окатышей приведен в табл. 3.

Таблица 3. Химический состав исходных и обожженных рудоугольных окатышей, мас. %

Окатыши	Fe _{общ}	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO
Исх.	46.45	45.45	18.81	7.95	0.75	7.07	1.71	7.14	0.57
Обож.	49.83	32.24	35.04	9.31	0.75	8.12	2.07	8.58	0.68
Окатыши	V ₂ O ₅	NiO	Cr ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CuO	CoO	P ₂ O ₅	SO ₃
Исх.	0.03	0.08	0.12	1.41	0.10	0.11	0.90	1.73	0.56
Обож.	0.05	0.00	0.11	1.46	0.06	0.10	0.10	2.06	0.68

Таблица 4. Условия проведения опытов по восстановимости

Опыт	ОНФ	ОФ
Класс крупности, мм	–12.5 + 10	–12.5 + 10
Масса перед восстановлением, г	500	500
Масса после восстановления, г	446.5	439.5
Восстановимость	57.46	67.94
Состав газа, %	100	100
СО	35	35
N ₂	65	65
Расход газа, дм ³ /мин	30	30
Температура нагрева, °С		
первые 40 мин		600
послед. 175 мин		1100

Исследование восстановимости железорудного сырья

Методика исследования по ГОСТ 17212-84 заключается в восстановлении пробы восстановительным газом (СО + Н₂) при заданных температурных условиях (до 1100°С) и определении степени восстановления по результатам химического анализа исходной и восстановленной пробы или потере массы кислорода при восстановлении. Результаты определения восстановимости неофлюсованных (ОНФ) и офлюсованных (ОФ) окатышей приведены в табл. 4 и 5. На рис. 1 приведены кинетические кривые восстановления исследуемых окатышей и окатышей Михайловского ГОКа (МГОК), сравнительный анализ которых показывает, что восстановительный процесс опытных офлюсованных окатышей протекает более полно в сравнении с неофлюсованными и практически идентичен промышленным окатышам МГОКа.

Исследование индекса низкотемпературного разрушения при нагревании (LTD)

Сущность методики заключается в восстановлении пробы газообразным восстановителем во вращающемся барабане при заданном температурном режиме и последующем рассеивании испытуемого материала на классы крупности, характеризующие его прочностные свойства. Исследование прочности при низкотемпературном восстановлении проводили на установке в соответствии с требованиями ISO 13930-1998. Результаты исследований прочности исследуемых материалов приведены в табл. 6. Анализ полученных результатов показывает, что “горячая” прочность у окатышей ОНФ, ОФ находится на уровне 81–97%, что обеспечивает высокую газопроницаемость слоя при использовании в агрегатах шахтного типа (доменная печь, вагранка, Мидрекс). Ме-

Таблица 5. Химический состав исходных и восстановленных образцов и экспериментальные значения восстановимости по ГОСТ 17212-84

Химический состав						
	исходная проба			восстановленная проба		
	Fe _{общ}	Fe _{мет}	FeO	Fe _{общ}	Fe _{мет}	FeO
ОНФ	55.31	0.00	2.50	58.73	25.26	34.00
ОФ	53.85	0.00	2.50	63.63	37.57	22.88
восстановимость						
	абс-1	абс-2	факт	абс'		
ОНФ	57.95	45.88	57.46	1.16		
ОФ	68.33	53.45	67.94	1.20		

таллизованные рудоугольные окатыши (ОМ) с индексом +6.3 мм LTD = 66% имеют достаточную прочность для использования в электропечах (ДСП, руднотермическая печь).

Исследование температур начала размягчения и температурного интервала размягчения (ТиРП)

Проведение этой методики заключается в нагреве пробы испытуемого материала в инертном газе и определении температуры начала размягчения по началу погружения жесткого штока в пробу под действием внешнего давления, а также температурного

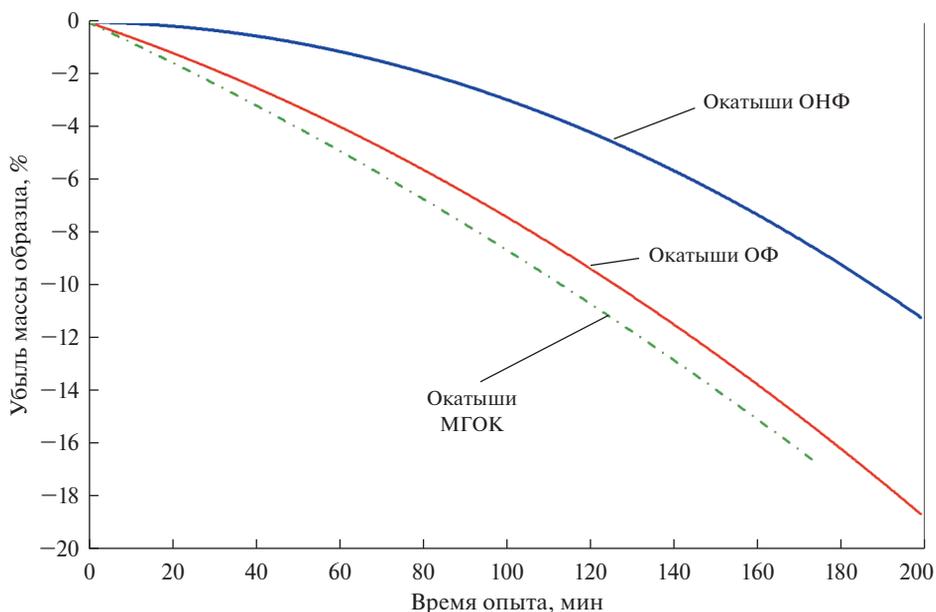


Рис. 1. Кинетические кривые восстановления опытных окатышей и промышленных окатышей МихГОКа (штрихпунктирная линия).

Таблица 6. Прочность материалов LTD (+6.3 мм) по ISO 13930

Окатыши	ОНФ	ОФ	ОМ
Класс крупности, мм	–12.5 + 10	–12.5 + 10	–12.5 + 10
Масса перед восстановлением, г	500.00	500.00	500.00
Масса после восстановления, г	494.20	496.60	311.80
Класс крупности после опыта, мм			
6.3	400.00	482.20	203.50
3.15	8.20	4.10	17.00
0.5	10.10	2.30	1.00
–0.5	75.90	8.00	90.30
LTD +6.3	80.94	97.10	65.27
LTD –3.15	17.40	2.07	29.28
LTD –0.5	15.36	1.61	28.96
Состав газа, %		100	
СО		20	
СО ₂		20	
Н ₂		2	
N ₂		58	
Расход газа, дм ³ /мин			
СО		4	
СО ₂		4	
Н ₂		0.4	
N ₂		11.6	

Таблица 7. ТИРП по ГОСТ 26517–85

Проба	ОНФ	ОФ	ОМ
Класс крупности, мм	–12 + 10	–12 + 10	–12 + 10
Температура начала размягчения, °С	1220	950	1020
Температура конца размягчения, °С	1430	1150	1160
Интервал размягчения, °С	210	200	140

интервала размягчения (40% усадки от исходной высоты навески). Исследование температурного интервала размягчения проводили в соответствии с ГОСТ 26517–85. Результаты исследований температурного интервала исследуемых проб материалов приведены в табл. 7.

По результатам проведенных опытов офлюсованные и металлизированные окатыши наиболее полно отвечают требованиям к интервалу размягчения–плавления для условий доменной плавки, а именно: чем меньше ТИРП, тем уже зона когезии и лучше газо- и гидродинамика в печах шахтного типа.

Исследование рентгенофазового состава исследуемых материалов

Методом рентгенофазового анализа проведено исследование исходного концентрата, а также окатышей (неофлюсованных и офлюсованных), полученных этого концен-

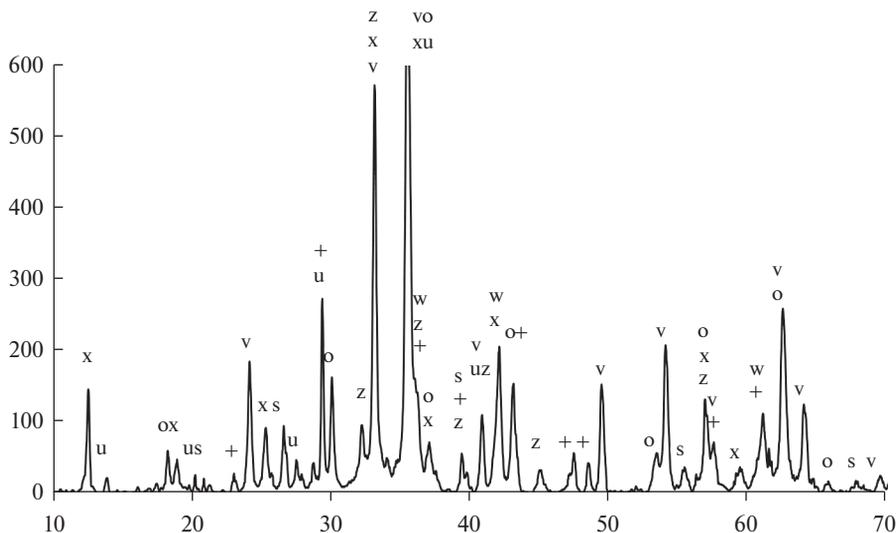


Рис. 2. Дифрактограмма исходного концентрата. Условные обозначения: v – Fe_2O_3 ; o – Fe_3O_4 ; w – FeO ; + – CaCO_3 ; x – $\text{Mg}_{0.24}\text{Mn}_{1.82}\text{Al}_{1.86}\text{Fe}_{0.09}\text{Si}_{0.98}\text{O}_5(\text{OH})_4$; s – SiO_2 (кварц); u – $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$; z – $\text{Na}_2(\text{CO}_3) \cdot \text{H}_2\text{O}$.

траты. Съемка образцов проводилась на рентгеновском дифрактометре марки XRD 7000C (фирма SHIMADZU) с автоматическим программным управлением, с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения (напряжение на трубке 40 кВ, ток на трубке 30 мА) и графитового монохроматора. Идентификацию фаз осуществляли, используя базу данных PDF2 (ICDD) (2018 г.).

Исследуемый исходный концентрат характеризуется (рис. 2) сложным фазовым составом. Основу концентрата составляет гематит (Fe_2O_3). Другие железосодержащие фазы представлены магнетитом (Fe_3O_4), вюститом (FeO), в небольшом количестве железо может присутствовать в Mn, Al, Mg-содержащем силикате. В табл. 8 приведен фазовый состав исходного концентрата по данным рентгенофазового анализа.

Исходный концентрат использовали для получения нефлюсованных и офлюсованных окатышей, окислительный обжиг которых осуществляли при температуре 1200°C. В окисленных и восстановленных окатышах железосодержащие фазы представлены магнетитом (Fe_3O_4 – является основной фазой), гематитом (Fe_2O_3 – его количество значительно меньше) и вюститом (FeO – в данной фазе может присутствовать MnO в виде твердого раствора, так как ионный радиус марганца больше чем у двухвалентного железа, что способствует увеличению параметра кристаллической решетки “d”). Силикатная часть в основном состоит из магнезиального геленита (в исходном) и акерманита алюминиевого (после восстановления). Это проявляется в различии содержания Al и Mg: больше алюминия и меньше магния в исходном обожженном нефлюсованном окатыше и наоборот в пробе подвергнутому нагреву до 500°C восстановительным газом по ISO 13930-1998.

Восстановление по ГОСТ 17212–84 обожженных нефлюсованных окатышей приводит к образованию металлического железа в форме α -Fe. При восстановлении растет содержание FeO, в небольших количествах остается Fe_3O_4 и Fe_2O_3 . Силикатная

Таблица 8. Фазовый состав исходного концентрата

Фазы, обнаруженные рентгенофазовым методом	Исходный концентрат
Fe ₂ O ₃ (гематит) Fe ₃ O ₄ (магнетит) FeO (вюстит) (Mn _{1,82} Al _{0,84} Mg _{0,24} Fe _{0,09})(Si _{0,98} Al _{1,02} O ₅)(OH) ₄ CaCO ₃ – гидрокарбонат кальция Na ₂ Ca(CO ₃) ₂ – ньеререйт Na ₂ (CO ₃)·H ₂ O – моногидрат карбоната натрия	Основная фаза
NaHCO ₃ – гидрокарбонат натрия	Возможно присутствует
3CaOAl ₂ O ₃ – трехкальциевый алюминат	Возможно присутствует
SiO ₂ – (кварц)	Основная фаза

часть состоит в основном из геленита (Ca₂Al₂SiO₇) и небольшого количества нефелина Na·(AlSiO₄).

Восстановление по ГОСТ 17212-84 офлюсованных обожженных окатышей приводит к образованию тех же фаз, что и без добавки флюса. Однако наблюдается наиболее четкое формирование структуры силикатной составляющей. Это можно объяснить присутствием дополнительного количества кальция, взятого в качестве флюса. Особенно это заметно при восстановлении офлюсованных окатышей. Количественная оценка фаз, образующихся в офлюсованных и нефлюсованных обожженных окатышах (исходных, частично восстановленных по ISO 13930–1998 и восстановленных по ГОСТ 17212–84) сведена в табл. 9.

На следующем этапе исследований были изучены возможности практического использования полученных окислованных железорудных материалов. Вопрос применимости офлюсованных и нефлюсованных окатышей в агломерационном производстве был подробно рассмотрен ранее в [3], поэтому для оценки возможного использования опытных рудоугольных окатышей, последние были проплавлены в лабораторной печи с получением металла и шлака, химический состав которых приведен в табл. 10. Плавка проводилась в обычных условиях характерных для электропечи, без добавок, с выдержкой после расплавления 30 мин для лучшего разделения металла и шлака.

Выход металла составил около 62% от исходной массы загруженных окатышей. Состав полученного металла соответствует высокопрочному аустенитно-бейнитного класса литейному чугуноу марки ПЛ-4. Полученный шлак содержит компоненты CaO и Al₂O₃, в количестве, которое позволяет рассматривать его как ценную добавку для получения либо глиноземсодержащих цементов либо, после предварительных подготовительных операций, последующий возврат в схему переработки бокситового сырья.

Термодинамические свойства шлака

Высокоглиноземистые шлаки с содержанием Al₂O₃ более 20 мас. % характеризуются повышенными значениями вязкости и низкой жидкотекучестью, что предопределяет значительные затруднения с обработкой такого шлака при пирометаллургическом переделе в доменном процессе или электроплавке. В связи с этим актуальной задачей становится предварительный оперативный контроль структурно-чувствительных свойств такого шлака с помощью тройных диаграмм состояния CaO–SiO₂–MgO наиболее полно представленных в [9]. Для удобства была разработана методика

Таблица 9. Фазовый состав исследуемых окатышей, мас. %

Проба	Фазы, обнаруженные рентгенографическим методом						
	α -Fe	Fe_3O_4	Fe_2O_3	FeO	геленит магnez, $\text{Ca}_2(\text{Mg}_{0,25}\text{Al}_{0,75})$ $(\text{Si}_{1,25}\text{Al}_{0,75}\text{O}_7)$	акерманит алюмин. $\text{Ca}_2\text{Mg}_{0,75}\text{Al}_{0,5}\text{Si}_{1,75}\text{O}_7$	нефелин $\text{Na}(\text{AlSiO}_4)$
Окатыш неофлюсов. (исх.)		63.85	20.83	1.27	14.05		
Окатыш неофлюсов (ISO 13930–1998)		62.69	10.95	3.24		23.12	
Окатыш неофлюсов (ГОСТ 17212–84)	30.05	7.52	8.19	22.74	18.75		12.75
Окатыш офлюсов. (исх.)		59.82	13.66	6.30	20.23		
Окатыш офлюсов (ISO 13930–1998)		60.55	11.96	4.40	23.09		
Окатыш офлюсов (ГОСТ 17212–84)	35.57	He опр.	7.72	21.48	29.4		5.30

Таблица 10. Химический состав металла и шлака, мас. %

Металл							
[C]	[Si]	[Ti]	[P]	[S]	[Mn]	[Cr]	[V]
4.85	2.40	0.25	1.18	0.057	0.69	0.05	0.11
Шлаковая часть							
CaO	MgO	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	MnO	$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	SO_3
44.40	4.16	17.20	1.76	25.14	0.18	1.85	5.20

расчета фигуративных точек температур кристаллизации в составе пакета электронных таблиц MS EXCEL для исследуемого состава оксидной системы в интервале содержания глинозема от 5 до 35% (мас.). На рис. 3 представлена программная реализация такой расчетной методики для расчета геометрического местоположения точки кристаллизации. Для полученного опытного шлака (25% Al_2O_3) температура кристаллизации лежит в диапазоне 1480–1485°C.

Для разработки модели расчета вязкости оксидных шлаковых систем, в качестве базовой, использовали методику определения вязкости шлака, представленную в [10] и позволяющую учитывать влияние максимально широкого спектра составов реальных шлаков в рабочем интервале температур. Дополнительно ввели в расчетную методику влияние соотношения в расплаве кислых, основных и амфотерных оксидов и влияние массовой доли каждого оксида в расплаве, а также влияние температуры расплава.

Уравнение для расчета вязкости имеет следующий вид:

$$\eta = A \cdot \eta_0 \cdot e^{\left(\frac{C}{B'}\right)}, \quad (1)$$

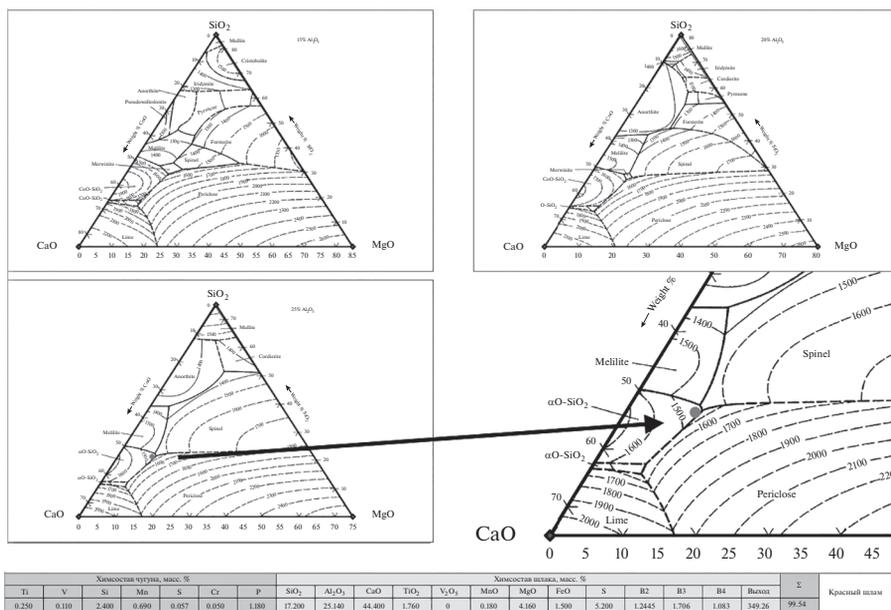


Рис. 3. Расчетная фигуративная точка (красный цвет) кристаллизации шлага электроплавки рудоугольных окатышей ОМ.

где $A = f(T)$ и $C = f(\Theta)$ – коэффициенты зависимости шлага от температуры и химического состава, соответственно; η_0 – коэффициент, характеризующий вязкость чистых оксидов в расплаве; B' – параметр, учитывающий основные и кислотные свойства шлага.

Эмпирические коэффициенты в уравнениях для расчета температурных коэффициентов A и C были подобраны с таким расчетом, чтобы как можно точнее подходить к экспериментальным данным, полученным для промышленных и полусинтетических шлаковых расплавов, а также соответствовать стандартному описанию измерений вязкости расплавов для различных температур. Параметр основности B' рассчитывается по формуле:

$$B' = \frac{\sum(a_i \cdot X_O)}{\sum(c_i \cdot X_K) + \sum(d_i \cdot X_A)}, \tag{2}$$

где a_i , c_i и d_i – коэффициенты для основных, кислотных и амфотерных оксидов шлага; $X_{O, K, A}$ – процентное содержание основных, кислотных и амфотерных оксидов шлага, %.

Коэффициент η_0 предполагается рассматривать функционально зависящим от состава и температуры расплава, т.е. $\eta_0 = f(T)$ и, например, для оксида алюминия принимается $\eta_{\text{Al}_2\text{O}_3} = -0.023 \cdot \ln(T) + 0.1753$.

Адекватность предложенной методики проверили по экспериментальным данным вязкости шлаков, полученных в условиях работы доменного цеха НТМК и ОХМК.

На рис. 4 представлены результаты расчетных и фактических значений вязкости различных шлаков по предложенной методике в интервале температур 1200–1550°C. Из анализа представленных данных можно сделать вывод о том, что разработанная методика определения вязкости шлага дает достаточно близкие значения вязкости к определенным экспериментальным путем данным. При вязкости менее 8 Пз жидко-

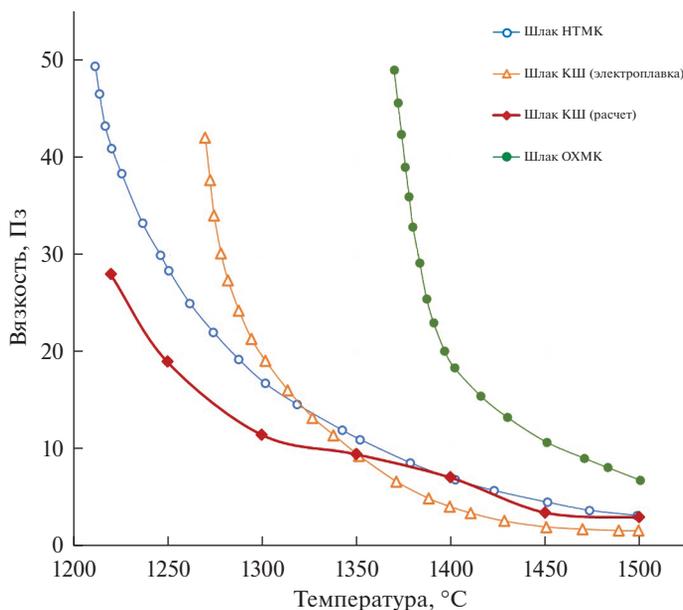


Рис. 4. Политермы фактических и расчетных значений вязкости шлаков.

подвижность шлака достаточна для его отработки и выпуска из печи, поэтому его температура должна быть не менее 1450–1500°C, что достаточно хорошо согласуется с найденным ранее значением температуры кристаллизации шлака – 1480–1485°C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований предложены технические решения, позволяющие комплексно утилизировать отходы, образующиеся при производстве алюминия (красные шламы) и прокатной окалины:

- разработаны оптимальные технологические режимы для получения коллективного железорудного концентрата гидрометаллургическим способом, соответствующего основным требованиям по химическому и гранулометрическому составу компонентов в области черной металлургии;
- получены в лабораторных условиях окускованный материал (окатыши) различной основности и степени металлизации, определены основные технологические параметры окускования и термообработки для получения заданных характеристик окатышей;
- проведены исследования по определению основных металлургических свойств (восстановимость, горячая прочность, интервалы размягчения и плавления) окатышей различного типа;
- с помощью методов математического моделирования определены технико-экономические показатели вариантов пирометаллургической схемы переработки исследуемых материалов с получением товарных продуктов различного назначения.

На основании проведенных исследований рекомендован вариант технологической схемы переработки железорудного концентрата с получением офлюсованных окатышей, используемых в качестве железосодержащей добавки для аглококодового производства или металлизированных окатышей для руднотермической плавки с получением товарного металла и глиноземсодержащего шлака, пригодного для последую-

щего использования в качестве добавки к бокситовому сырью для процесса Байера либо для получения цемента в строительной индустрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Танутров И.Н., Свиридова М.Н., Чесноков Ю.А., Маршук Л.А. // Изв. вузов. Черная металлургия. 2020. **63**. № 11–12. Р. 891–898.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-11-12-891-898>
2. Танутров И.Н., Свиридова М.Н., Лямкин С.А., Чесноков Ю.А., Овчинникова Л.А., Маршук Л.А. // Бутлеровские сообщения. 2019. **58**. № 6. С. 97–103.
<https://butlerov.com/stat/reports/details.asp?lang=ru&id=32432>
3. Чесноков Ю.А., Маршук Л.А., Танутров И.Н., Свиридова М.Н. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. **76**. № 1. Р. 68–73.
<https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-1-68-73>
4. Распопов Н.А., Корнеев В.П., Аверин В.В. Восстановление оксидов железа при пирометаллургической переработке красных шламов // Металлы. 2013. № 1. С. 41–45.
5. Корнеев В.И., Сусс А.Г., Цеховой А.И. Красные шламы: свойства, складирование, применение. М.: Металлургия, 1991.
6. Деревянкин В.А., Кузнецов С.И., Чупраков В.Я., Леонтьев Л.И. Комплексное использование низкокачественных бокситов. М.: Металлургия, 1972.
7. Мушкетов А.А., Газалеева Г.И., Сопина Н.А., Власов И.А. Выбор схемы обогащения красных шламов // Цветные металлы. 2013. № 7. С. 46–50.
8. Яценко С.П., Пягай И.Н., Пасечник Л.А., Суриков В.Т., Анашкин В.С., Климентенко Г.Н. Комплексная переработка и обезвреживание отхода глиноземного производства -красных шламов // Третий международный конгресс “Цветные металлы-2011”, г. Красноярск. 2011. С. 123–126.
9. Allibert M., Gaye H. Slag Atlas. Dusseldorf: Stahleisen, 1995.
10. Iida T., Sakai H., Kawasima T., Kurihara Y.: Proc. 5th Int. Conf. on Molten Slags, Fluxes and Salts'97, Sydney, Australia, Iron & Steel Society, 1997.
11. Смирнов Д.И., Молчанова Т.В., Водолазов Л.И., Пеганов В.И. Методы переработки красных шламов // Цветные металлы. 2002. № 8. С. 64–69.
12. Леонтьев Л.И., Дюбанов В.Г., Зиновьев Д.В., Грудинский Д.И. Обзор мировой практики переработки красных шламов. Часть 1. Пирометаллургические способы // Изв. вузов. Черная металлургия. 2018. № 11. С. 843–858.
13. Можаренко Н.М., Носков В.А., Нестеров А.С. Влияние красных шламов на металлургические свойства агломерата // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. трудов. Днепропетровск. 2004. № 3. С. 62–70.
14. Чесноков Ю.А., Леонтьев Л.И., Дмитриев А.Н. Пирометаллургическая переработка отходов алюминиевого производства // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2013. № 3. С. 19–22.
15. Чесноков Ю.А. Информационная система “Интерактивные расчеты в черной металлургии” // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2015. № 12. С. 63–67.
16. Братыгин Е.В., Газалеева Г.И., Дмитриева Е.Г., Калугин Я.И. Использование обогащенных красных шламов при производстве высокоофлюсованного агломерата с целью дальнейшей их переработки в доменных печах // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2013. № 1. С. 30–34.
17. Роменец В.А., Валавин В.С., Похвиснев Ю.В. Утилизация красных шламов алюминиевой промышленности процессом Ромелт // Цветные металлы. 2011. № 7. С. 39–44.
18. Коршунов Е.А., Буркин С.П., Логинов Ю.Н. Патент № 2245371 С2 РФ, МПК С21В 3/04, С21В 13/00, С22В 34/12. Способ переработки красного шлама глиноземного производства: № 2003103262/02. Оpubл. 27.01.2005.
19. Жумашев К.Ж., Торговец А.К., Кутжанова А.М. Изучение способов переработки красного шлама и оценка возможности развития нового направления исследований // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы IV Междунар. Интеракт. научно-практич. Конф. Екатеринбург, 2015. С. 122–126.
20. Столяревский А.Я. Патент № 2542177 С1 РФ, МПК С22В 7/00, С22В 1/24, С22В 1/02. Способ переработки красного шлама: № 2013147294/02. Оpubл. 20.02.2015.
21. Ни Л.П., Пономарев В.Д., Сажин В.С. Авторское свидетельство № 117646 А1 СССР, МПК С22В 7/00, С01F 7/38. Способ переработки красного шлама, содержащего титан: № 598559. Оpubл. 01.01.1958.

INVESTIGATION OF THE METALLURGICAL PROPERTIES OF MATERIALS PRODUCED BY THE JOINT UTILIZATION OF RED MUD AND ROLLING DROSS

L. I. Leontiev¹, Yu. A. Chesnokov¹, I. N. Tanutrov¹, M. N. Sviridova¹, L. A. Marshuk¹

¹*Institute of Metallurgy, Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia*

As a result of the experimental studies carried out, samples of agglomerated products were obtained by the methods of oxidative firing, deep metallization and pressing. The physico-chemical and metallurgical properties of the objects of study, which significantly affect the technical and economic indicators of the subsequent technology of industrial processing, are studied. The starting materials were obtained by the hydrometallurgical method during the joint leaching of aluminum production waste (red mud) and pipe-rolling production (oily scale). Under laboratory conditions, various types of agglomerated products, including oxidized and ore-coal pellets, briquettes with different chemical compositions and a given CaO/SiO₂ basicity ratio, were obtained from an experimental batch of iron ore concentrate. The main technological parameters of agglomeration and heat treatment are determined to obtain the specified characteristics for this type of iron ore raw materials. The main standardized metallurgical characteristics of the obtained materials, such as reducibility according to GOST 17212–84, strength during high-temperature processing according to ISO 13930–1998, as well as the temperatures of the beginning and end of the softening of materials according to GOST 26517–85, were studied for the purpose of further mathematical modeling and comparative analysis of technical economic indicators in various metallurgical units in substantiating the choice of optimal parameters for various technological schemes for processing this type of iron ore raw materials. The X-ray phase composition of the feedstock and processed products was studied, and the main structural components of the studied materials obtained by the joint utilization of red mud and mill scale were identified. A technique has been developed for calculating the crystallization temperature and viscosity of slags based on triple and quadruple state diagrams of CaO–SiO₂–MgO–Al₂O₃ for on-line analysis and control of the structure-sensitive properties of oxide systems. The software implementation of the calculation according to the proposed methods in MS Excel spreadsheets has been carried out.

Keywords: recycling, red mud, oily mill scale, leaching, blast furnace process, flow chart

REFERENCES

1. Tanutrov I.N., Sviridova M.N., Chesnokov Yu.A., Marshuk L.A. // *Izv. vuzov. Chernaya Metallurgiya*. 2020. **63**. № 11–12. P. 891–898. [In Russian].
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-11-12-891-898>
2. Tanutrov I.N., Sviridova M.N., Lyamkin S.A., Chesnokov Yu.A., Ovchinnikova L.A., Marshuk L.A. // *Butlerovskiye soobshcheniya*. 2019. **58**. № 6. P. 97–103. [In Russian].
<https://butlerov.com/stat/reports/details.asp?lang=ru&id=32432>
3. Chesnokov Yu.A., Marshuk L.A., Tanutrov I.N., Sviridova M.N. // *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii*. 2020. **76**. № 1. P. 68–73. [In Russian].
<https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-1-68-73>
4. Raspopov N.A., Korneev V.P., Averin V.V. *Vosstanovleniye oksidov zheleza pri pirometallurgicheskoy pererabotke krasnykh shlamov* [Recovery of iron oxides during pyrometallurgical processing of red mud] // *Metally*. 2013. № 1. P. 41–45. [In Russian].
5. Korneev V.I., Suss A.G., Tsekhoi A.I. *Krasnyye shlamy: svoystva, skladirovaniye, primeneniye* [Red mud: properties, storage, application]. M.: Metallurgiya, 1991. [In Russian].
6. Derevyankin V.A., Kuznetsov S.I., Chuprakov V.Ya., Leontiev L.I. *Kompleksnoye ispol'zovaniye nizkokachestvennykh boksitov* [Integrated use of low-quality bauxites]. M.: Metallurgiya, 1972. [In Russian].
7. Mushketov A.A., Gazaleeva G.I., Sopina N.A., Vlasov I.A. *Vybor skhemy obogashcheniya krasnykh shlamov* [The choice of scheme for the enrichment of red mud] // *Tsvetnyye metally*. 2013. № 7. P. 46–50. [In Russian].

8. Yatsenko S.P., Pyagai I.N., Pasechnik L.A., Surikov V.T., Anashkin V.S., Klimentenok G.N. Kompleksnaya pererabotka i obezvezhivaniye otkhoda glinozemnogo proizvodstva-krasnykh shlamov [Complex processing and disposal of alumina production waste – red mud] // Third International Congress “Tsvetnyye metally-2011”, Krasnoyarsk. 2011. P. 123–126. [In Russian].
9. Allibert M., Gaye H. Slag Atlas. Dusseldorf: Stahleisen, 1995.
10. Iida T., Sakai H., Kawasima T., Kurihara Y. Proc. 5th Int. Conf. on Molten Slags, Fluxes and Salts’97, Sydney, Australia, Iron & Steel Society, 1997.
11. Smirnov D.I., Molchanova T.V., Vodolazov L.I., Peganov V.I. Metody pererabotki krasnykh shlamov [Methods of red mud processing] // Tsvetnyye metally. 2002. № 8. P. 64–69. [In Russian].
12. Leontiev L.I., Dyubanov V.G., Zinoviev D.V., Grudinsky D.I. Obzor mirovoy praktiki pererabotki krasnykh shlamov. Chast’ 1. Pirometallurgicheskiye sposoby [Review of the world practice of red mud processing. Part 1. Pyrometallurgical methods] // Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya. 2018. № 11. P. 843–858. [In Russian].
13. Mozharenko N.M., Noskov V.A., Nesterov A.S. Vliyaniye krasnykh shlamov na metallurgicheskiye svoystva aglomerata. [Influence of red mud on the metallurgical properties of sinter] // Fundamental’nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii: Sb. nauchn. trudov. Dnepropetrovsk. 2004. № 3. P. 62–70. [In Russian].
14. Chesnokov Yu.A., Leontiev L.I., Dmitriev A.N. Pirometallurgicheskaya pererabotka otkhodov alyuminiyevogo proizvodstva [Pyrometallurgical processing of wastes of aluminum production] // Vestnik MGTU im. G.I. Nosova. 2013. № 3. P. 19–22. [In Russian].
15. Chesnokov Yu.A. Informatsionnaya sistema “Interaktivnyye raschety v chernoy metallurgii” [Information system “Interactive calculations in ferrous metallurgy”] // Chernaya metallurgiya. Byulleten’ nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii. 2015. № 12. P. 63–67. [In Russian].
16. Bratygin E.V., Gazaleeva G.I., Dmitrieva E.G., Kalugin Ya.I. spol’zovaniye obogashchennykh krasnykh shlamov pri proizvodstve vysokooflyusovannogo aglomerata s tsel’yu dal’neyshey ikh pererabotki v domennykh pechakh [The use of enriched red mud in the production of high-flux sinter for the purpose of their further processing in blast furnaces] // Chernaya metallurgiya. Byulleten’ nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii. 2013. № 1. P. 30–34. [In Russian].
17. Romenets V.A., Valavin V.S., Pokhvisnev Yu.V. Utilizatsiya krasnykh shlamov alyuminiyevoy promyshlennosti protsessom Romelt [Utilization of red mud from the aluminum industry by the Romelt process] // Tsvetnyye metally. 2011. № 7. P. 39–44. [In Russian].
18. Korshunov E.A., Burkin S.P., Loginov Yu.N. Patent № 2245371 C2 RF, IPC C21B 3/04, C21B 13/00, C22B 34/12. Sposob pererabotki krasnogo shlama glinozemnogo proizvodstva [Method for processing red mud from alumina production]: № 2003103262/02. Published 01/27/2005. [In Russian].
19. Zhumashev K.Zh., Torgovets A.K., Kutzhanova A.M. Izucheniye sposobov pererabotki krasnogo shlama i otsenka vozmozhnosti razvitiya novogo napravleniya issledovaniy [Studying the methods of processing red mud and assessing the possibility of developing a new direction of research] // Innovatsii v materialovedenii i metallurgii. IV Intern. Interact. scientific and practical. Conf. Yekaterinburg, 2015. P. 122–126. [In Russian].
20. Stolyarevsky A.Ya. Patent № 2542177 C1 RF, IPC C22B 7/00, C22B 1/24, C22B 1/02. Sposob pererabotki krasnogo shlama [Red mud processing method]: № 2013147294/02. Published 20.02.2015. [In Russian].
21. Ni L.P., Ponomarev V.D., Sazhin V.S. Copyright certificate № 117646 A1 USSR, IPC C22B 7/00, C01F 7/38. Sposob pererabotki krasnogo shlama, soderzhashchego titan [Method for processing red mud containing titanium]: № 598559. Publ. 01/01/1958. [In Russian].