

УДК 622.349.3

ИЗУЧЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА РЕДКОМЕТАЛЬНОГО ШЛАКА, ПОЛУЧЕННОГО ПРИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОМ ОБЖИГЕ РУДЫ ЧУКТУКОНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ¹

©2024 г. Д.Г. Агафонов, Г.Б. Садыхов, Т.В. Олюнина, А.Б. Михайлова, С.Б. Румянцева

ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва
E-mail: agafonov-1802@mail.ru

Поступила в редакцию 26 июня 2024 г.

После доработки 16 сентября 2024 г. принята к публикации 25 сентября 2024 г.

Исследован фазовый состав ниобий-редкоземельного шлака при восстановительном обжиге высокожелезистой редкометальной руды Чуктуконского месторождения — одного из самых богатых источников ниобия и редкоземельных металлов (РЗМ) в России. Установлено, что при восстановительном обжиге (1400 °С) образуются четыре основные фазы: бетафит $\text{Ca}_2(\text{Nb}, \text{Ti})_3\text{O}_8$, брито-лит $\text{Ca}_4(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Pr})(\text{Si}, \text{P})_6\text{O}_{26}$, шпинель с общей формулой $(\text{Mn}, \text{Fe}, \text{Mg})(\text{Al}, \text{V})_2\text{O}_4$ и стекловидная матрица. С увеличением расхода твердого восстановителя (кокса) с 11 до 17% массы руды меняется количественное соотношение фаз редкометального шлака, в то время как фазовый состав остается неизменным. По мере увеличения добавки кокса количество марганцевой шпинели и бритолита в шлаке (без учета стекловидной фазы) уменьшается соответственно с 46 до 27 и с 42 до 34%, а количество бетафита, наоборот, увеличивается с 12 до 39%. По данным микронного анализа ниобий и титан сосредоточены в бетафите и стекловидной матрице. Редкоземельные элементы распределяются по всем фазам кроме шпинели, которая не разлагается минеральными кислотами даже при высоких температурах в автоклавных условиях. Показано, что в результате удаления железа и фосфора в составе чугуна шлак, получающийся при восстановлении руды, становится в 5—6 раз более богатым редкими и редкоземельными элементами по сравнению с рудой. Это приводит к снижению материальных потоков при дальнейшем сернокислотном выщелачивании шлака с извлечением РЗМ в раствор и концентрированием ниобия и титана в остатке.

Ключевые слова: редкоземельные металлы; ниобий; Чуктуконское месторождение; восстановительный обжиг; ниобий-редкоземельный шлак; фазовый состав.

Чуктуконское месторождение (Красноярский край, Россия) — уникальный источник ниобия и редкоземельных металлов (РЗМ), потребление которых в высокотехнологичных материалах неуклонно растет [1, 2]. Руды этого месторождения содержат до 1,5% Nb_2O_5 и 7% $\Sigma\text{TR}_2\text{O}_3$, что сопоставимо с рудами богатого ниобиевого месторождения Араша (Бразилия) и крупнейшего редкоземельного месторождения Баюнь-Обо (Китай) [3]. Однако простота добычи и низкая себестоимость переработки бразильского и китайского редкометального сырья привели к монополизации Бразилией и Китаем рынка ниобия и РЗМ [4]. При ужесточении условий

импорта в РФ возникла реальная угроза для развития многих гражданских и военных отраслей промышленности. Принимаемые в связи с этим меры направлены на увеличение внутреннего потребления РЗМ и развитие собственной редкометальной промышленности — от добычи сырья до получения готовой продукции для перспективных технологий [5].

Сложный минеральный состав и отсутствие эффективных технологических решений по обогащению высокожелезистых руд Чуктуконского месторождения требуют нового технологического подхода к разработке комплексной схемы их переработки [6—8]. Для этого в Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова (ИМЕТ РАН) разрабатывается новая технология

¹Работа выполнена по государственному заданию №075-00320-24-00.

Таблица 1

Химический состав исследованной пробы руды Чуктуконского месторождения, %

Компонент	%	Компонент	%
Al ₂ O ₃	2,64	ThO ₂	<0,05
BaO	0,20	TiO ₂	0,42
CaO	0,28	V ₂ O ₅	0,11
Fe ₂ O ₃	66,97	ZnO	0,92
MgO	0,20	ZrO ₂	0,03
MnO	2,44	CeO ₂	1,89
Na ₂ O	0,22	Gd ₂ O ₃	0,06
Nb ₂ O ₅	1,03	La ₂ O ₃	0,99
P ₂ O ₅	3,55	Nd ₂ O ₃	0,79
SiO ₂	1,63	Pr ₂ O ₃	0,15
SrO	0,27	Y ₂ O ₃	0,13

Таблица 2

Химический состав золы кокса, %

Компонент	%	Компонент	%
SiO ₂	57,89	SrO	0,15
Al ₂ O ₃	23,65	V ₂ O ₅	0,07
Fe ₂ O ₃	7,12	MnO	0,067
CaO	2,87	ZrO ₂	0,06
MgO	1,72	Cr ₂ O ₃	0,02
K ₂ O	1,55	S	<0,02
Na ₂ O	1,19	Nb ₂ O ₅	<0,01
TiO ₂	1,13	Y ₂ O ₃	0,009
P ₂ O ₃	0,27	П.п.п.	0,76
BaO	0,19		

комплексной переработки руд Чуктуконского месторождения, направленная на получение ниобиевого, редкоземельного и марганцевого концентратов, а также высокофосфористого чугуна. Ранее в работе [9] были проведены исследования по восстановительному обжигу чуктуконской руды твердым восстановителем (коксом) с получением редкометалльного шлака и фосфористого чугуна. Проба этой руды имела следующий состав², %: Fe₂O₃ 64,80; MnO 7,10; Al₂O₃ 3,06; P₂O₅ 4,14; CaO 2,42; ΣTR₂O₃ 3,66; Nb₂O₅ 1,54; TiO₂ 1,20. Основными фазами шлака после восстановительного обжига при 1400 °С были фазы со структурой лопарита и перовскита, марганцевая шпинель и стекловидная фаза. В лопарите и перовските концентрируется основное количество ниобия и титана, а редкие земли распределены по всем образующимся фазам кроме марганцевой шпинели. Однако при ином содержании некоторых элементов в руде, например кальция и титана, при тех же условиях восстановительного обжига в ниобий-редкоземельном шлаке возможно образование других фаз. Формирование нового фазового состава может повлиять на технологические показатели при дальнейшей гидрометаллургической переработке шлака, в частности на извлечение РЗМ, ниобия и марганца в конечные продукты.

В связи с этим целью данной работы было изучение фазового состава шлака, полученного при восстановительном обжиге пробы высокожелезистой чуктуконской руды с разным количеством углеродного восстановителя, в сравнении с данными [9].

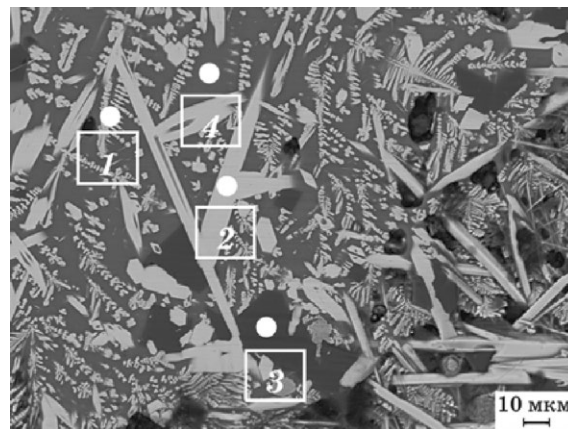
Материалы и методика исследований. Исследования проводились на пробе руды, химический состав которой представлен в табл. 1. Основными железосодержащими минералами этой пробы являются гётит (FeOOH) и гематит (Fe₂O₃). Марганец и ниобий находятся соответственно в Ва-псиломелане (BaMn₅O₁₀·H₂O) и Ва-Sr-пирохлоре ((Ba,Sr)Nb₂O₆(OH)), РЗМ входят в состав фосфатов — флоренсита (LaAl₃(PO₄)₂(OH)₆) и монацита ((Ce,La,...)PO₄). В отличие от пробы руды, использованной в работе [9], данная проба имеет более низкое содержание кальция, марганца и титана (см. табл. 1).

²Здесь и далее по тексту статьи содержание компонентов и фаз в мас. %.

В исследованиях в качестве твердого восстановителя использовали кокс крупностью –0,1 мм и зольностью 11% (табл. 2). Добавляемый кокс смешивали с измельченной РЗМ-рудой в количестве от 11 до 17% ее массы. Полученную шихту брикетировали на гидравлическом прессе при давлении прессования 550 МПа с получением брикета массой 14 г. Образец помещали в алундовый тигель на угольную подложку и подвергали восстановительному обжигу в вертикальной трубчатой электропечи при температуре 1400 °С. Длительность нагрева с 1000 до 1400 °С составляла 10 мин с последующей выдержкой при заданной температуре 10 мин для лучшего разделения металла и шлака. Полученные образцы шлака измельчали и исследовали методами оптического, РФА, микрозондового и химического анализов. Оптический и микрозондовый анализы проводили с помощью электронного микроскопа Joel JXA-iSP 100. Для проведения РФА использовали дифрактометр Tongda 3700. Количественный химический состав шлака

определяли методом рентгенофлуоресцентного спектрального анализа (спектрометр MagiX PRO PANalytical).

Результаты исследований и их обсуждение. Шлак, полученный при восстановительном обжиге чукуконских руд, представляет собой искусственное редкометальное сырье. Согласно оптическому анализу образцов все шлаки имеют практически одинаковый фазовый состав. Они состоят из трех кристаллических фаз: бетафита, бритолита и шпинели, находящихся в стекле. Их содержание меняется в зависимости от количества добавленного восстановителя. На фиг. 1 представлена микроструктура шлака, полученного при восстановительном обжиге. Так, по данным РФА количество шпинели в шлаке уменьшается с 46 до 27% с увеличением количества восстановителя от 11 до 17% (табл. 3). При расходе кокса 13—17% основной кристаллической фазой является бетафит. Шлак, полученный при минимальном расходе кокса (11% массы руды), содержит около 10% монацита, который остается в руде. Это связано с недостаточным количеством углерода, необходимого для восстановления рудных фаз (фиг. 2).

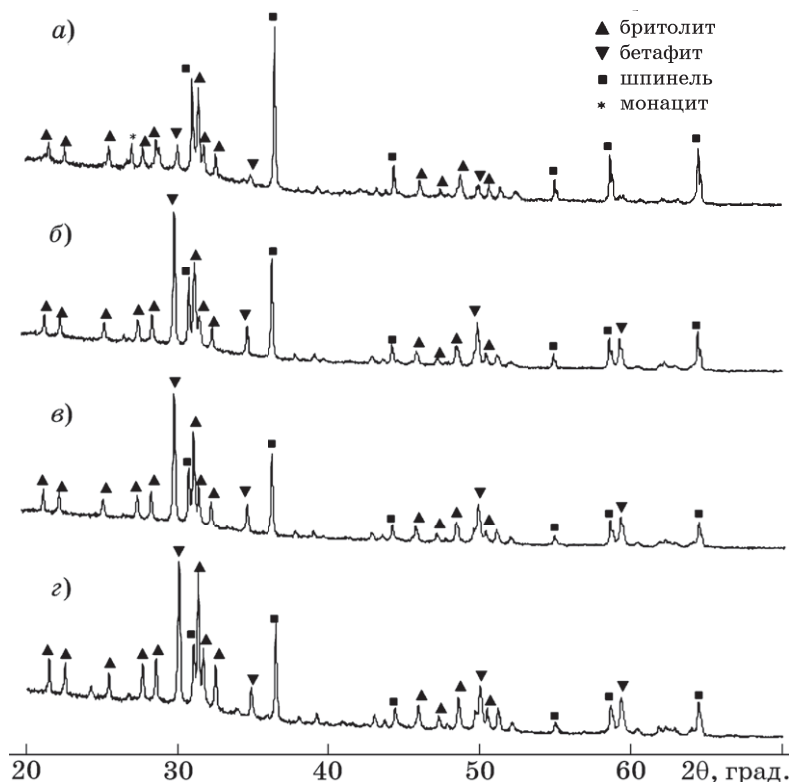


Фиг. 1. Микроструктура шлака: 1 — бетафит; 2 — бритолит; 3 — шпинель; 4 — стекло

Таблица 3

Содержание фаз в шлаках, полученных при 1400 °С с выдержкой 10 мин (без учета стекловидной фазы)

Расход кокса, % массы руды	Содержание фазы, %			
	бетафит	бритолит	шпинель	монацит
11	12	42	46	10
13	50	25	25	—
15	42	31	27	—
17	39	34	27	—



Фиг. 2. Дифрактограммы шлаков, полученных восстановительным обжигом (1400 °С, 10 мин) при расходе кокса от массы руды 11 (а), 13 (б), 15 (в) и 17% (г)

Таблица 4

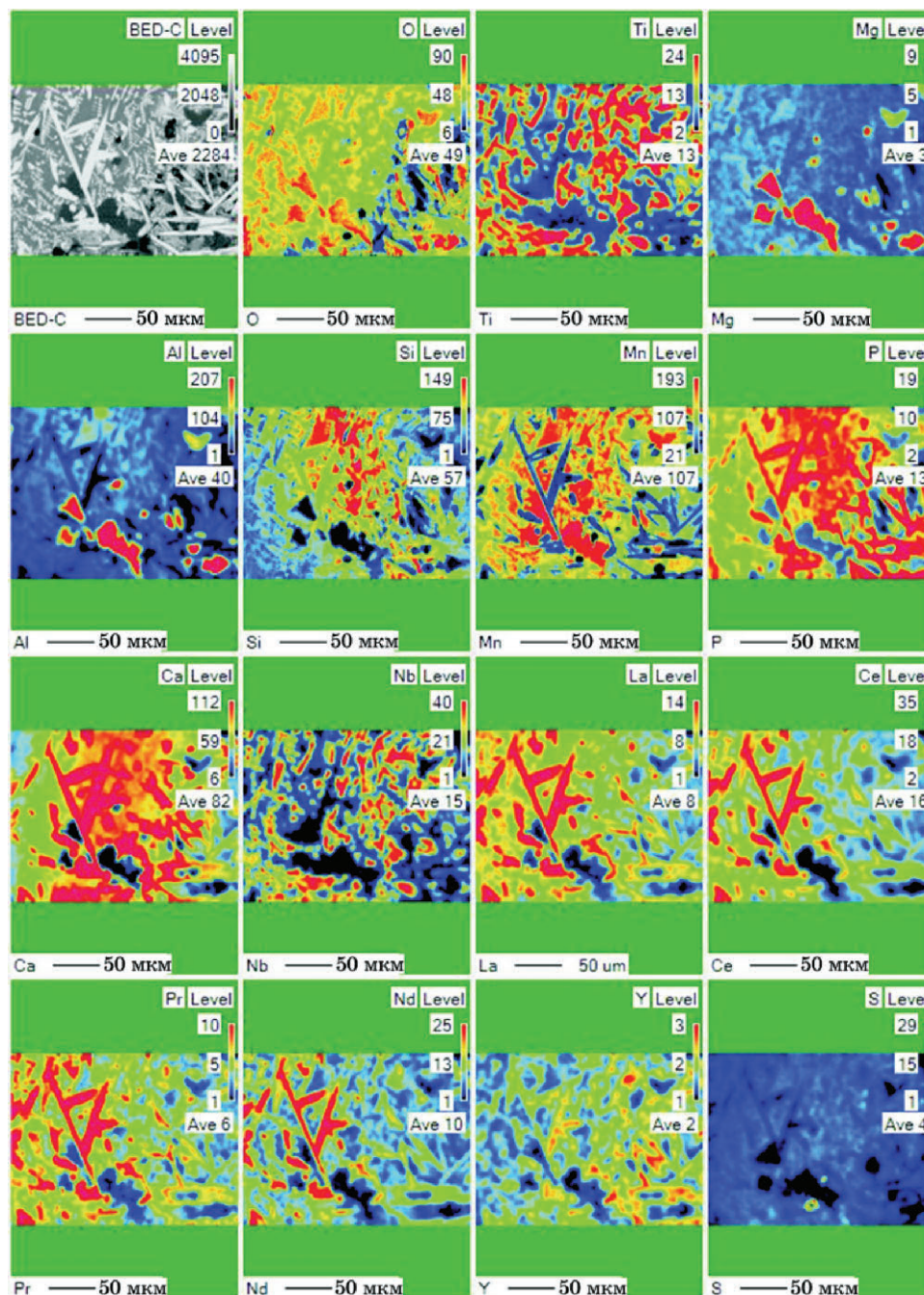
Химический состав, %, фаз шлака в зависимости от расхода кокса при восстановительном обжиге чулунконской руды

Расход кокса, %	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	TiO ₂	V ₂ O ₅	MnO	FeO	BaO	SrO	Nb ₂ O ₅	Y ₂ O ₃	La ₂ O ₃	CeO ₂	Pr ₆ O ₁₁	Nd ₂ O ₃
Стекло																	
11	0,58	9,12	23,52	4,55	3,52	2,82	—	16,05	8,15	3,53	2,52	7,67	—	5,67	9,62	1,62	4,44
13	0,37	15,58	28,57	2,58	3,04	—	—	18,83	8,03	4,16	3,81	—	—	4,75	5,21	1,28	1,07
15	0,12	16,86	25,94	0,52	3,70	1,23	—	16,06	3,67	4,48	3,38	6,05	—	4,84	7,70	2,39	4,61
17	0,43	18,24	24,74	—	3,72	2,10	—	17,61	1,10	3,72	2,95	7,14	—	5,24	8,16	0,65	1,77
Шпинель																	
11	4,62	52,90	—	—	—	0,56	3,23	15,33	24,62	—	—	—	—	—	—	—	—
13	5,28	53,54	—	—	—	0,42	1,78	23,52	15,45	—	—	—	—	—	—	—	—
15	8,34	53,89	—	—	—	—	3,79	24,78	9,21	—	—	—	—	—	—	—	—
17	7,92	56,22	—	—	—	0,73	1,98	28,07	5,10	—	—	—	—	—	—	—	—
Бритолит																	
11	—	0,04	16,94	6,64	8,26	—	—	2,83	0,31	—	—	—	0,82	15,29	31,59	4,15	12,46
13	—	—	19,35	3,19	6,58	—	0,47	1,39	—	—	0,42	—	1,40	16,61	33,38	4,41	12,62
15	—	—	20,63	1,44	5,80	—	—	0,97	—	—	1,98	—	2,21	16,77	33,83	4,31	11,96
17	—	—	22,01	0,40	5,81	—	—	0,80	—	—	1,21	0,10	1,47	17,38	34,35	4,63	11,78
Бетафит																	
11	—	—	—	—	3,18	12,07	—	13,63	4,43	—	—	28,89	0,30	7,58	19,00	2,48	8,32
13	—	—	—	—	2,54	12,16	—	11,52	3,09	—	—	30,89	1,31	8,18	19,23	2,64	8,45
15	—	—	—	—	4,30	10,99	—	17,41	3,06	—	—	25,88	0,54	8,54	19,01	2,87	7,44
17	—	—	—	—	2,90	12,22	—	10,56	—	—	—	32,29	1,00	7,25	20,48	2,40	10,93

По результатам микронзондового анализа *стекловидная фаза* имеет очень богатый химический состав, представленный практически всеми элементами, которые находятся в руде (табл. 4). С увеличением расхода восстановителя содержание FeO в стекле уменьшается с 8,15 до 1,10%, а содержание P_2O_5 — с 4,55 до 0,52%, что связано с восстановлением этих элементов до металла. Содержание других элементов остается примерно одинаковым вне зависимости от количества восстановителя.

Шпинель представлена черными в оптике кристаллами кубического габитуса разного размера. Ее состав можно выразить формулой $(Mn,Fe,Mg)(Al,V)_2O_4$. Содержание FeO в шпинели уменьшается с 24,62 до 5,1% из-за восстановления железа в чугун, а содержание MgO и MnO возрастает с увеличением расхода кокса, содержание Al_2O_3 , V_2O_5 и TiO_2 остается практически неизменным (табл. 4).

Фаза *бритолита* относится к силикофосфатам редкоземельных элементов — редкий



Фиг. 3. Результаты элементного картирования по площади шлифа образца шлака

Химический состав шлака, %

Компонент	%	Компонент	%
Al ₂ O ₃	16,79	ThO ₂	<0,01
BaO	1,10	TiO ₂	2,37
CaO	1,82	V ₂ O ₅	0,48
Fe _{ТВ}	4,56	ZnO	0,04
MgO	1,26	ZrO ₂	0,16
MnO	13,20	CeO ₂	10,16
Na ₂ O	1,29	La ₂ O ₃	5,32
Nb ₂ O ₅	5,26	Nd ₂ O ₃	4,25
P ₂ O ₅	0,47	Pr ₂ O ₃	0,81
SiO ₂	15,13	Y ₂ O ₃	0,70
SrO	1,47		

тип соединений, относящийся к группе апатита [10,11]. Состав бритолита, образующегося в шлаках при восстановлении руды, можно представить формулой $\text{Ca}_4(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Pr})(\text{Si}, \text{P})_6\text{O}_{26}$. В основном выделения бритолита представляют собой длиннопризматические кристаллы разных размеров. Химический состав бритолита практически одинаковый для всех образцов за исключением содержания кремния и фосфора (см. табл. 4). Содержание SiO₂ возрастает с 16,94 до 22,01%, а содержание P₂O₅ снижается с 6,64 до 0,4% вследствие увеличения степени восстановления фосфора и его перехода в чугун.

Бетафит относится к группе пироклора с общей формулой $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_6(\text{O}, \text{OH}, \text{F})$, где А — Са, TR; В — Nb, Ti, Fe, Mn [12]. В условиях высокотемпературного обжига образуются редкоземельные бетафиты, но без добавочных анионов OH⁻ и F⁻ с формулой $\text{A}_2\text{B}_3\text{O}_8$. По данным микроскопического анализа в шлифах бетафит представлен в основном очень мелкими дендритными кристаллами. Они могут образовывать выделения в стекле в виде «облаков», состоящих из мелких (~1 мкм) дендритов. Химический состав бетафита с увеличением расхода кокса практически не изменяется (см. табл. 4). Основными его элементами являются ниобий (28—32% Nb₂O₅), титан (11—12% TiO₂), марганец (10—17% MnO) и церий (19—20% CeO₂).

Монацит представляет собой фосфат РЗМ с формулой $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Pr})\text{PO}_4$ и содержит примерно 29% P₂O₅, 38% CeO₂, 22% La₂O₃. Данная фаза присутствует только в шлаке, полученном при минимальной добавке восстановителя (11%).

Для визуальной оценки распределения элементов по фазам шлака было проведено элементное картирование по площади шлифа образца шлака, полученного при восстановительном обжиге руды с расходом кокса 13% (фиг. 3). Результаты картирования подтверждают, что основное количество РЗМ сосредоточено в стекле, бритолите и бетафите. Ниобий и титан в основном связаны с бетафитом и стеклом. Недовосстановленный фосфор распределен между стеклом и бритолитом. Марганец находится практически во всех присутствующих фазах.

Таким образом, увеличение расхода кокса на восстановительный обжиг руды практически не влияет на фазовый состав нио-

бий-редкоземельного шлака. Однако при этом уменьшается количество шпинели из-за восстановления железа, присутствующего в данной фазе. Ниобий, титан и РЗМ распределены между всеми фазами кроме шпинельной, которая не разлагается минеральными кислотами при любых условиях. В табл. 5 представлен химический состав шлака, полученного при восстановительном обжиге руды при 1400 °С с расходом кокса 15% массы руды. Его сравнение с химическим составом исходной руды показывает, что содержание ниобия, РЗМ и марганца в шлаке увеличилось в 5—6 раз, что заметно упрощает дальнейшую обработку шлака соляной кислотой. Стоит отметить, что в отличие от результатов работы [9] в шлаке вместо фаз лопарита и перовскита в стекловидной матрице образуются фазы бритолита и бетафита. Стекловидная матрица и бритолит легко разлагаются в разбавленных растворах соляной кислоты уже при атмосферных условиях. Однако бетафит, в котором концентрируется основное количество ниобия, титана и РЗМ, вскрывается только при более высоких давлениях и температурах (выше 200 °С) [13]. Аналогичное поведение наблюдается при разложении лопарита и перовскита [14].

После солянокислотной обработки измельченного шлака в раствор переходят РЗМ и марганец, которые в дальнейшем методом дробного осаждения извлекаются в виде карбонатов [15]. Ниобий-титановый остаток направляется на обескремнивание разбавленным раствором NaOH для удаления выпавшего аморфного кремнезема при солянокислотном выщелачивании шлака. После ще-

лочного выщелачивания остатков в основном состоит из оксидов ниобия и титана, а также неразлагаемой минеральными кислотами марганцевой шпинели. С учетом того, что шпинель проявляет слабомагнитные свойства, одним из вариантов ее удаления из обескремненного остатка может стать мокрая магнитная сепарация с выделением шпинели в магнитную, а оксидов ниобия и титана в немагнитную фракции. Применение данного процесса позволит выделить оксидный ниобий-титановый концентрат, пригодный для хлорирования по известной технологии и дальнейшего получения из хлоридов металлических ниобия и титана. Для доизвлечения марганца и алюминия выделенную марганцевую шпинель можно направить на переработку по способу спекания с содой.

Выводы. 1. Исследован процесс восстановительного обжига высокожелезистой ниобий-редкоземельной руды Чуктуконского месторождения при температуре 1400 °С и длительности выдержки 10 мин с разным расходом твердого восстановителя (кокса). Установлено, что основными фазами образующегося при этом ниобий-редкоземельного шлака являются бетафит, бритолизит, стекло и марганцевая шпинель.

2. Выявлено, что расход кокса практически не влияет на фазовый состав редкометалльного шлака, но при этом оказывает влияние на количественное соотношение фаз в нем. С увеличением расхода кокса с 11 до 17% массы руды содержание шпинели в шлаке уменьшается с 45 до 27%, а количество бетафита, наоборот, растет с 12 до 39%.

3. Редкоземельные элементы присутствуют во всех фазах за исключением марганцевой шпинели. Ниобий и титан в шпинели также не обнаружены, что исключает дальнейшие потери этих элементов при солянокислотном выщелачивании шлака с извлечением РЗМ и марганца в раствор при концентрировании ниобия и титана в остатке.

4. В результате восстановления железа и фосфора руды с образованием фосфористого чугуна содержание РЗМ, ниобия и других элементов в шлаке, отделенном от чугуна, повышается в 5—6 раз, что во столько же раз уменьшит материальные потоки при дальнейшей гидрометаллургической переработке шлака с получением ниобий-титанового, марганцевого и РЗМ-концентратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никулин, А.А. Металлы для высоких технологий: тенденции мирового рынка редкоземельных металлов / А.А. Никулин // Проблемы национальной стратегии. 2014. №1 (22). С.134—152.
2. Машковцев, Г.А. Минеральное сырье для металлов высоких технологий / Г.А. Машковцев, Л.З. Быховский, Т.Д. Онтеева // Разведка и охрана недр. 2020. №2. С.10—24.
3. Яценко, В.А. Особенности мирового рынка редкоземельных металлов / В.А. Яценко, Н.Ю. Самсонов, Я.В. Крюков // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2018. №6. С.68—72.
4. U.S. Geological Survey: Mineral Commodity Summaries 2023. 210 p.
5. Государственная программа Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности». Подпрограмма 15. Развитие промышленности редких и редкоземельных металлов. URL: <https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-pravitelstva-rf-ot-29082013-n-1535-r/gosudarstvennaia-programma-rossiiskoi-federatsii-razvitie/podprogramma-15/> (дата обращения 05.04.24).
6. Кузьмин, В.И. Состав и структурные особенности редкометалльных руд Чуктуконского месторождения / В.И. Кузьмин, Н.В. Гудкова, Д.В. Кузьмин, А.М. Жижаев, Г.Н. Бондаренко, М.А. Мулагалеева, А.С. Романченко // Химия в интересах устойчивого развития. 2018. №18. С.157—166.
7. Лихникевич, Е.Г. Минералогические критерии выбора технологии переработки руд редких металлов / Е.Г. Лихникевич, Е.Г. Ожогина, А.С. Фатов // Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2019. №4. С.42—48.
8. Лихникевич, Е.Г. Опережающие минералогические исследования руд редких металлов — основа для прогнозирования технологических свойств и выбора оптимальных технологических решений: дис. ... докт. геол.- минерал. наук / Е.Г. Лихникевич. — М.: Всерос. науч.-исслед. ин-т мин. сырья им. Н.М. Федоровского. ФГБУ ВИМС. 2020. 180 с.
9. Садыхов, Г.Б. Исследования по восстановительному обжигу ниобий-редкоземельных руд Чуктуконского месторождения с получением фосфористого чугуна и ниобий-редкоземельного шлака / Г.Б. Садыхов, Д.Ю. Копьев, Д.Г. Агафонов, Т.В. Олюнина, К.Г. Анисонян, Е.Н. Левченко // Металлы. 2020. №3. С.3—13. — (G.B. Sadykhov, D.Yu. Kop'ev, D.G. Agafonov, T.V. Olyunina, K.G. Anisonyan, E.N. Levchenko, «Reducing Roasting of the Niobium-REM Ores of the Chuktukon Deposit with the Production of Phosphorus Cast Iron and Niobium-REM Slag». Russian Metallurgy (Metally). 2020. №5. P.507—516.)
10. Куприянова, И.И. Минералы группы бритолизита / И.И. Куприянова, Г.А. Сидоренко, М.А. Кудрина // Геология месторождений редких элементов. Редкоземельные силикаты. 1966. Вып.26. С.23—66.
11. Li, J. Innovative methodology to enrich britholite ($\text{Ca}_3\text{Ce}_2[(\text{Si},\text{P})\text{O}_4]_3\text{F}$) phase from rare-earth-rich slag by super gravity / J. Li, Z. Guo // Met. Mater. Trans. 2014. V.45. P.1272—1280.
12. Зеликман, А.Н. Ниобий и тантал / А.Н. Зеликман, Б.Г. Коршунов, А.В. Елютин, А.М. Захаров. — М.: Металлургия, 1990. 296 с.

13. *Агафонов, Д.Г.* Фазовое разложение при двустадийном солянокислотном выщелачивании ниобий-редкоземельного шлака, полученного при восстановительном обжиге редкометально-редкоземельной руды Чуктуконского месторождения / Д.Г. Агафонов, Д.Ю. Копьев, Г.Б. Садыхов // Редкие металлы и материалы на их основе : технологии, свойства и применение : Сб. тезисов 2-й Международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика Н.П. Сажина. Москва. 2022. С.278, 279.
14. *Садыхов, Г.Б.* Особенности солянокислотного разложения ниобий-редкоземельного шлака, полученного при восстановительном обжиге редкоземельной руды Чуктуконского месторождения / Г.Б. Садыхов, Д.Ю. Копьев, Д.Г. Агафонов, Т.В. Олюнина, К.Г. Анисонян // Металлы. 2021. №4. С.3—10. — (G.B. Sadykhov, D.Yu. Kop'ev, D.G. Agafonov, T.V. Olyunina, K.G. Anisonyan, «Hydrochloric Acid Decomposition of the Niobium-Rare-Earth Slag Produced by Reducing Roasting of the Rare-Earth Ore from the Chuktukon Deposit». Russian Metallurgy (Metally). 2021. №7. P.809—815.)
15. *Агафонов, Д.Г.* Некоторые особенности дробного осаждения редкоземельных металлов и марганца из солянокислотных растворов карбонатом аммония / Д.Г. Агафонов, Г.Б. Садыхов, Т.В. Олюнина // Металлы. 2023. №6. С.3—8. — (D.G. Agafonov, G.B. Sadykhov, T.V. Olyunina, «Fractional Precipitation of Rare-Earth Metals and Manganese from Hydrochloric Acid Solutions by Ammonium Carbonate». Russian Metallurgy (Metally). 2023. №11. P.1577—1582.)