

УДК 669.295.3

ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЙ ОБЖИГ ЧЕРНОВОГО ТИТАНОМАГНЕТИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА МЕСТОРОЖДЕНИЯ ГРЕМЯХА-ВЫРМЕС С ПОЛУЧЕНИЕМ ТИТАНОВАНАДИЕВОГО ШЛАКА И ГРАНУЛИРОВАННОГО МЕТАЛЛА¹

©2023 г. К.В. Гончаров, А.С. Агамирова, Г.Б. Садыхов, Т.В. Олюнина

*ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова (ИМЕТ) РАН,
Москва**E-mail: goncharov-imet@mail.ru**Поступила в редакцию 1 марта 2023 г.**После доработки 5 мая 2023 г. принята к публикации 16 мая 2023 г.*

Приведены результаты исследований по восстановительному обжигу черного титаномagnetитового концентрата месторождения Гремяха-Вырмес. Восстановительный обжиг брикетированной шихты проводили на угольной подложке с получением гранулированного металла и титанованадиевого шлака, пригодного для последующей гидрометаллургической переработки с извлечением титана и ванадия. Исследования по восстановительному обжигу выполняли в интервале температур 1450—1500 °С при разных расходах твердого восстановителя — кокса. Изучено влияние содержания кокса в смеси и температуры восстановления на состав получаемого титанованадиевого шлака. В результате твердофазного восстановления черного титаномagnetитового концентрата установлены оптимальные условия получения пригодного для дальнейшей переработки титанованадиевого шлака.

Ключевые слова: титаномagnetит; месторождение Гремяха-Вырмес; восстановление; титанованадиевый шлак; титан; пентаоксид ванадия; аносовит; гранулированный металл.

Россия по запасам титана занимает второе место в мире после Китая. Значительная часть запасов титана представлена титаномagnetитами. Титаномagnetит — минерал сложного состава, представляющий собой структуру распада первичного гомогенного высокотемпературного твердого раствора с выделением при снижении температуры самостоятельных фаз, располагающихся в magnetитовой матрице. В титаномagnetите месторождения Гремяха-Вырмес выделившимися фазами являются пластинчатые шпинель $MgAl_2O_4$ и ильменит $FeTiO_3$ [1].

Юго-восточный участок массива Гремяха-Вырмес, расположенный в центральной части Мурманской области, считается одним из крупнейших в России месторождений титаномagnetитовых и ильменитовых руд. На участке выявлены шесть рудных тел с общими прогнозными запасами около 87

млн. т руды при среднем содержании диоксида титана 13,4% [2—4]. Из руд данного месторождения при обогащении получают кондиционный ильменитовый и черновой титаномagnetитовый концентраты [5]. В настоящее время разработка этого месторождения признана нецелесообразной, так как отсутствует эффективный способ переработки титаномagnetитового концентрата с извлечением железа, ванадия и титана.

Современная промышленная переработка титаномagnetитовых концентратов в мире осуществляется двумя способами: пиро- и гидрометаллургическим.

В гидрометаллургическом способе предполагаются предварительный обжиг титаномagnetитов с реакционными щелочными добавками, водное выщелачивание огарка с извлечением ванадия в раствор, осаждение его из раствора в виде ванадата или поливанадата аммония, прокалку ванадатов с получением пентаоксида ванадия. Этот способ может в принципе применяться ко многим

¹Работа выполнена по государственному заданию № 075-01176-23-00.

рудам, однако он экономически эффективен только для переработки сырья с повышенным содержанием ванадия [6, с.42—47], а также при использовании твердого остатка в качестве железорудного сырья. Гидрометаллургический способ имеет ряд недостатков, к которым относятся большие материальные потоки и образование жидких отходов. Помимо этого при высоком содержании титана использование твердых остатков как железорудного сырья становится проблематичным.

Наиболее распространена пирометаллургическая переработка титаномагнетитов, которая осуществляется по двум схемам — коксоδοменной (доменная плавка) и бескоксодовой (электроплавка) [7—9]. Доменная плавка титаномагнетитов хорошо отработана для руд, содержащих до 4% TiO_2 . При более высоком содержании TiO_2 применяется электроплавка, однако этот способ довольно дорогостоящий и энергоемкий. Оба способа используются для выплавки ванадиевого чугуна, при этом титан безвозвратно теряется с низкотитанистыми отвальными шлаками.

В ИМЕТ РАН на базе фундаментальных исследований разработаны научные основы и технологические решения комплексной переработки титаномагнетитов с получением природнолегированной качественной стали и извлечением ванадия и титана. Для исследований использованы титаномагнетитовые концентраты около десяти месторождений России. Суть предлагаемой технологии состоит в следующем. Окатыши титаномагнетитовых концентратов подвергают предварительному восстановлению, затем ведут разделительную плавку с получением стального полупродукта, содержащего 0,05—0,35% V, и титанованадиевого шлака, содержащего 40—60% TiO_2 , 2,5—7% V_2O_5 . Стальной полупродукт перерабатывается в ковшах на качественную сталь. Из шлака гидрометаллургическим способом получают пентаоксид ванадия и синтетический рутил — ценное сырье для производства титана и пигментного диоксида титана хлоридным способом [10—12]. Однако применение электроплавки даже с учетом предварительной металлизации связано со значительными энергетическими затратами. Для их снижения в ИМЕТ РАН проводились исследования по восстановительному обжигу титаномагнетитовых концентратов Куранахского месторождения с прямым получением же-

леза и титанованадиевого шлака по технологии ITmk-3 [13].

Процесс ITmk-3 — это технология третьего поколения в производстве чугуна. Ее главная и уникальная особенность состоит в том, что восстановление и плавление углеродсодержащих окатышей осуществляется при относительно низкой температуре (1350 °C), причем горячий металл легко отделяется от шлака. По сравнению с обычными способами получения чугуна технология ITmk-3 имеет ряд следующих основных преимуществ: восстановление и шлакоотделение происходят в течение нескольких минут, металл легко отделяется от шлака и представляет собой готовый гранулированный продукт; более низкие требования к качеству восстановителя; относительно небольшой масштаб производства [14—16].

С учетом этого для изучения возможности использования черного титаномагнетитового концентрата месторождения Гремяха-Вырмес как комплексного железо-титанованадиевого сырья исследования по восстановительному обжигу концентрата проводили по технологии ITmk-3.

Материал и методы исследований. Для решения поставленной задачи использовали черновой титаномагнетитовый концентрат следующего химического состава, %:

$\text{Fe}_{\text{общ}}$	Fe_2O_3	TiO_2	SiO_2	Al_2O_3
53,26	76,15	10,94	3,87	3,91
CaO	MgO	V_2O_5	MnO	Cr_2O_3
0,14	2,01	0,61	0,17	0,08
SO_3	P_2O_5	$(\text{K,Na})_2\text{O}$		
1,16	0,05	0,35		

Восстановительный обжиг концентрата проводили в печи Таммана при разных температурах (1450—1500 °C) и добавках твердого восстановителя (кокса) в среде аргона. Титаномагнетитовый концентрат, флюсующую добавку (3% CaCO_3 от массы концентрата) и кокс измельчали до крупности –0,1 мм, смешивали в заданных пропорциях и прессовали брикеты. В качестве связующего применялся сульфит-целлюлозный целок. Брикеты помещали в графитовый тигель, в его графитовой крышке имелось отверстие для термомпары. Использовали вольфрам-молибденовую термopару. Время выдержки при заданной температуре составляло 5 мин. На дно тигля загружали подложку из измельченного до 1—2 мм кокса.

Микроскопический анализ полученных образцов шлаков проводили с помощью оптического микроскопа Carl ZeissAxio Scope. Химический состав металла определяли с помощью прибора-анализатора CS6000 фирмы LECO. Рентгенофазовый анализ (РФА) шлаков выполняли на дифрактометре высокого разрешения Ultima IV фирмы Rigaku, микронзондовый анализ фаз шлаков — на растровом электронном микроскопе JXA-ISP 100. Содержание ванадия в металле определяли путем полного растворения навески металла в серной кислоте и последующего анализа раствора методом титрования солью Мора.

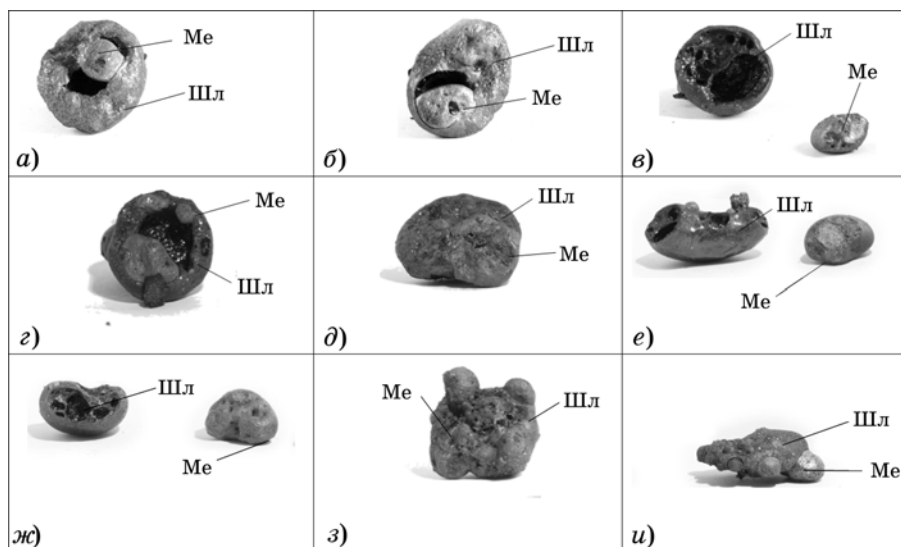
Результаты исследования и их обсуждение. В отличие от железных концентратов в титаномагнетитовых концентратах часть оксидов железа связана с диоксидом титана в разные фазы, что оказывает существенное влияние на процесс восстановления. Кроме того, при высоких температурах происходит восстановление диоксида титана до низших оксидов, что приводит к образованию новых шлаковых фаз, состав которых сильно зависит от таких факторов, как состав шихты, температура и длительность обжига и др. В условиях восстановительного обжига в металлическую фазу частично переходят кремний, марганец, ванадий, хром и другие элементы [17].

Исходный черновой титаномагнетитовый концентрат месторождения Гремяха-Вырмес согласно данным РФА представлен титано-

магнетитом, ильменитом и большим количеством силикатных минералов, среди них оливин $2(\text{Mg,Fe})\text{O}\cdot\text{SiO}_2$, альбит $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ и тремолит $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ [18].

Для эффективной переработки титаномагнетитового концентрата с применением способа прямого восстановления железа необходимо найти определенные условия, чтобы обеспечить одновременное наиболее полное восстановление железа в металлические гранулы с хорошим механическим их отделением от шлака и получение пригодного для дальнейшей переработки шлака с извлечением ванадия и титана. Для этого восстановительный обжиг проводили на угольной подложке с имитацией загрузки брикетов на под печи монослоем. Это необходимо также для изоляции одного брикета от другого, чтобы не допустить их спекания, которое впоследствии усложнит разделение продуктов. Для снижения температуры плавления, уменьшения вязкости шлака и улучшения коагуляции жидкого металла вводили небольшое количество флюсующей добавки CaCO_3 (ее оптимальное количество — 3% определено ранее [19]).

Установлено, что при обжиге брикетов в интервале температур 1450—1500 °С с добавками восстановителя 2—22% угольная подложка активно участвует в восстановлении концентрата. При температуре 1475 °С уже при расходе 2% кокса формируются гранулы металлического железа (фиг. 1) с извлечением в них 49% Fe. При добавке 16%



Фиг. 1. Внешний вид спеков, полученных в результате восстановления чернового титаномагнетитового концентрата при температуре 1475 °С при расходе восстановителя, %: а — 2; б — 8; в — 12; г — 16; д — 17; е — 18; ж — 20; з — 21; и — 22; Me — металл; Шл — шлак

кокса извлечение железа в гранулы составляет 94%, а при добавках 18—20% извлечение железа достигает ~100%. Расход кокса более 20% приводит к перевосстановлению шлака, увеличению его вязкости и, как следствие, ухудшению коагуляции металла. Разделение металлический и шлаковой фаз затрудняется и извлечение железа в гранулы уменьшается до 79—88%. Снижение температуры восстановления до 1450 °C приводит к уменьшению выхода металла на 3—10%, при этом качество разделения фаз остается примерно на том же уровне. При повышении температуры до 1500 °C коагуляция металла улучшается и облегчается разделение металла и шлака, но только при добавках кокса более 20%.

Таким образом, оптимальными условиями для полноты выхода гранул и улучшения отделения их от шлака являются расход кокса 18—20% и температура 1475 °C.

Полученный в установленных условиях металлический продукт в зависимости от расхода кокса содержит от 0,15 до 0,30% V и является низкокремнистым (0,010—0,112% Si) и высокоуглеродистым (1,59—2,11% C). В дальнейшем такой металл можно направить на конвертерный передел, что позволит получить не только качественную сталь, но и ванадиевый шлак с низким содержанием кремнезема. Это положительно скажется на эффективности дальнейшей переработки шлака [20].

Микроскопический анализ и РФА позволили выявить особенности формирования фазового состава титанованадиевых шлаков, полученных при температуре 1475 °C с добавками восстановителя от 2 до 22%. По данным РФА уже при расходе кокса 2% происходит частичное восстановление концентрата, что подтверждается наличием ульвошпинели Fe_2TiO_4 и аносовита (фиг. 2). Аносовит представляет собой сложный твердый раствор, состав которого характеризуется общей формулой $m[(\text{Me})\text{O}_2 \cdot \text{TiO}_2] \cdot n[(\text{Me})_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2] \cdot p\text{TiO}_2$. Он образуется в результате взаимного растворения титанатов трехвалентных элементов ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$, $\text{Ti}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$ и $\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$) и дититанатов двухвалентных элементов ($\text{FeO} \cdot 2\text{TiO}_2$, $\text{MgO} \cdot 2\text{TiO}_2$ и др.) [21]. Формирование при восстановительном обжиге аносовита существенно облегчает селективное извлечение ванадия из шлака при последующем его окислительном обжиге благодаря

легкому окислению в области температур 900—1000 °C с переходом ванадия в растворимые ванадаты и выделением основной части титана в виде рутильной фазы.

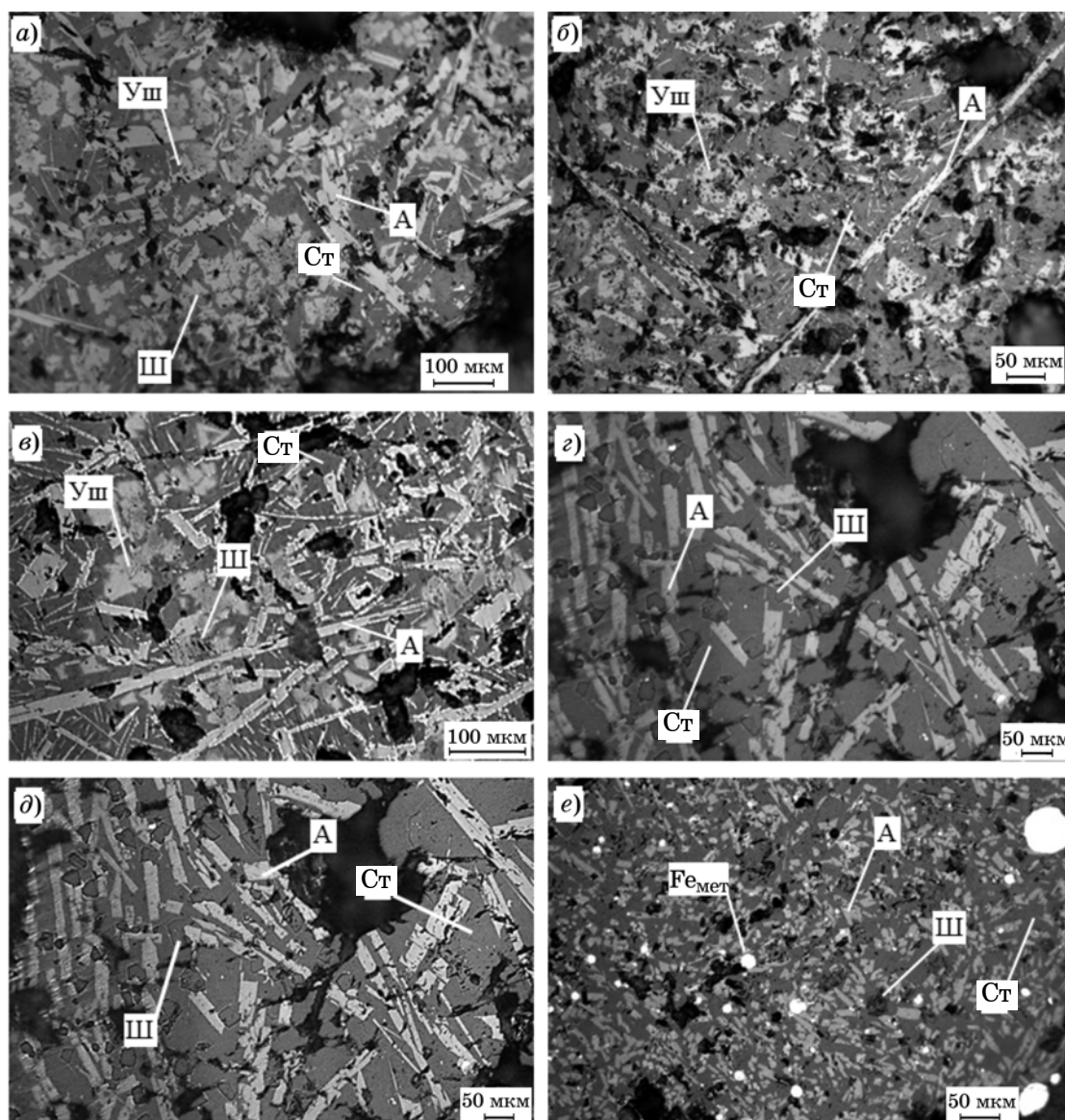
Наличие ульвошпинели свидетельствует о неполном восстановлении титаномagnetита. При этом металлических корочек в объеме шлака практически нет, что говорит о хорошей коагуляции металлического железа.

Шлак, полученный в оптимальных условиях восстановительного обжига титаномagnetитового концентрата, состоит из аносовита, Al-Mg-шпинели, пироксена и стекла. Химический состав шлака, полученного в оптимальных условиях восстановительного обжига, следующий, %:

FeO	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
4,56	29,28	24,01	19,53	8,57
MgO	V ₂ O ₅	MnO	Cr ₂ O ₃	SO ₃
8,56	0,94	0,48	0,12	2,72
(K,Na) ₂ O				
1,18				

Результаты микрозондового анализа шлака (приведены далее в таблице) показали, что титан присутствует во всех фазах. Основной титансодержащей фазой является аносовит, который содержит 86—89% TiO_2 и 2,1—3,0% V_2O_5 . Кроме того, значительное количество титана (12—20%) содержится в клинопироксене, ванадия в нем практически нет. Шпинель содержит 6,8—8,1% TiO_2 и 0,5—1,8% V_2O_5 . Снижение температуры до 1450 °C или увеличение добавки карбоната кальция до 5% практически не влияют на химический состав фаз шлака.

Таким образом, в результате восстановительного обжига черного титаномagnetитового концентрата при температуре 1475 °C, расходах кокса 18—20% и карбоната кальция 3% образуются хорошо отделяемые при магнитной сепарации железные гранулы. Металл может быть переработан с получением стали и ванадиевого шлака для производства пентаоксида ванадия. Титанованадиевый шлак восстановительного обжига далее предлагается перерабатывать по схеме окислительный обжиг—солянокислотное автоклавное выщелачивание с извлечением титана и ванадия. Титанованадиевый шлак, содержащий около 30% TiO_2 и 1% V_2O_5 , подвергается окислительному обжигу без добавок при температуре 1200 °C в течение 30—



Фиг. 2. Микроструктуры шлаков, полученных восстановлением при 1475 °С и расходе кокса, %: а — 2; б — 8; в — 16; г — 18; д — 20; е — 22; Ш — шпинель; Уш — ульвошпинель; А — аносовит; Ст — стекло и силикаты; Fe_{мет} — металлическое железо

Результаты микрозондового анализа титанованадиевого шлака, полученного при расходе флюсующей добавки CaCO₃ 3—5%

CaCO ₃ , %	t, °С	Фаза шлака	Среднее содержание в фазе, %									
			Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	V ₂ O ₅	MnO	FeO
5	1450	Аносовит	—	4,5	4,1	—	—	—	88,9	2,1	0,1	0,3
3	1450		—	4,7	5,3	—	—	—	86,0	3,0	0,0	1,0
3	1475		—	4,0	5,5	—	—	—	88,8	2,1	0,1	0,2
5	1450	Mg-Al-шпинель	—	29,9	58,6	—	—	—	8,1	1,9	0,5	1,0
3	1450		—	30,1	60,1	—	—	—	6,8	1,8	0,6	1,0
3	1475		—	30,4	59,6	—	—	—	7,7	1,7	0,4	0,4
5	1450	Клинопироксен	—	7,9	15,2	30,9	—	25,1	19,2	0,5	0,3	1,0
3	1450		0,3	10,5	15,8	36,9	—	23,9	12,3	—	0,4	—
3	1475		—	10,7	15,5	37,5	0,1	23,5	12,0	0,3	0,3	0,3
3	1475	Стекло	4,8	5,6	24,8	47,1	2,2	9,2	5,8	—	0,1	0,3

60 мин. Полученный огарок выщелачивается соляной кислотой в две стадии — атмосферное и автоклавное выщелачивание.

На первой стадии выщелачивание огарка проводится солянокислым раствором, полученным на стадии автоклавного выщелачивания. При этом концентрация раствора доводится до 5—6% HCl. Процесс ведется при соотношении Т:Ж = 1:(4—5) и температуре 80 °С. Твердый остаток после отделения от маточного раствора направляется на автоклавное солянокислотное разложение, а маточный раствор — на поэтапную нейтрализацию с отдельным осаждением железа с ванадием, алюминия и магния в виде их гидроксидов и карбонатов. Отработанный раствор утилизируется с извлечением реагента-осадителя и получением товарного хлорида кальция [16, 22].

Автоклавное выщелачивание твердого остатка осуществляется в растворе 18% HCl при 180 °С в течение 120 мин. При этом практически все компоненты кроме TiO₂ и SiO₂ переходят в раствор, TiO₂ выделяется в осадок в виде рутила, а SiO₂ находится в аморфном виде. Солянокислотный раствор хлоридов направляется на атмосферное выщелачивание огарка, а твердый остаток подвергается обескремниванию путем выщелачивания в растворе 5—10% NaOH при температуре около 100 °С в течение 60 мин [23]. Конечный высокотитановый продукт содержит более 86% TiO₂ и может быть переработан известным хлорным способом с получением металлического титана или пигментного TiO₂.

Выводы. 1. Установлены оптимальные условия восстановительного обжига черного титаномагнетитового концентрата месторождения Гремяха-Вырмес с получением гранулированного железа и пригодного для переработки титанованадиевого шлака: температура восстановления 1475 °С, расход кокса 18—20%, флюсующая добавка карбоната кальция 3%.

2. Изучены химический, фазовый составы шлаков, а также межфазовое распределение элементов. Показано, что шлак состоит из аносовита, Al-Mg-шпинели, пироксена и стекла. Основной титансодержащей фазой является аносовит, который содержит 86—89% TiO₂ и 2,1—3,0% V₂O₅.

3. Показана возможность переработки шлака по схеме окислительный обжиг—со-

лянокислотное автоклавное выщелачивание с получением высокотитанового продукта (86% TiO₂) и извлечением ванадия и других ценных составляющих.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резниченко, В.А. Титанаты. Научные основы, технология, производство / В.А. Резниченко, А.А. Аверин, Т.В. Олюнина. — М.: Наука, 2010. 267 с.
2. Горбунов, Г.И. Минеральные месторождения Кольского полуострова / Г.И. Горбунов, И.В. Бельков, С.И. Макиевский. — М.: Наука, 1981. 272 с.
3. Борисенко, Л.Ф. Комплексное использование титаномагнетитовых руд: обзор / Л.Ф. Борисенко, Л.М. Дельцын, В.А. Полубабкин, Е.Д. Усков. — М.: ЗАО «Геоинформмарк». 1997. 65 с. — (Лабораторное и технологическое исследование минерального сырья).
4. Шабалин, Л.И. Титаномагнетитовые месторождения (геология, генезис, перспективы промышленного использования) / Л.И. Шабалин. — Новосибирск: СНИИГГиМС, 2010. 174 с.
5. Ракаев, А.И. Изучение особенностей вещественного состава ильменит-титаномагнетитовых руд месторождения Юго-Восточная Гремяха (ЮГВ) и выбор рациональной схемы обогащения / А.И. Ракаев, С.А. Алексеев, Т.А. Морозова, Е.В. Черноусенко // Вестн. МГТУ. 2009. Т.12. №4. С.614—618.
6. Дерябин, Ю.А. Перспективы переработки чинейских титаномагнетитов / Ю.А. Дерябин, Л.А. Смирнов, А.А. Дерябин. — Екатеринбург: Сред.-Ур. кн. изд-во, 1999. С.42—47.
7. Леонтьев, Л.И. Пирометаллургическая переработка комплексных руд / Л.И. Леонтьев, Н.А. Ватолин, С.В. Шаврин, Н.С. Шумаков. — М.: Металлургия, 1997. 432 с.
8. Резниченко, В.А. Титаномагнетиты. Месторождения, металлургия, химическая технология / В.А. Резниченко, Л.И. Шабалин. — М.: Наука, 1986. 295 с.
9. Мизин, В.Г. Комплексная переработка ванадиевого сырья: химия и технология / В.Г. Мизин, Е.М. Рабинович, Т.П. Сирина, В.Г. Добощ, М.Е. Рабинович, Т.И. Красненко. — Екатеринбург: Изд. УрО РАН, 2005. 415 с.
10. Садыхов, Г.Б. Нефтеносные титановые пески Ярегского месторождения — решение проблемы титанового сырья в России / Г.Б. Садыхов, В.А. Резниченко, Ю.В. Заблоская, Т.В. Олюнина, Н.Ю. Киришкина, К.Г. Анисонян, Д.Ю. Копьев, И.М. Зеленова // Титан. 2006. №1. С.12—19.
11. Погудин, Д.С. Исследование одностадийного процесса металлизации титаномагнетита месторождения Гремяха-Вырмес / Д.С. Погудин, А.А. Морозов, Г.Б. Садыхов, Т.В. Олюнина, Л.И. Леонтьев // Цв. металлы. 2011. №1. С.73—77.
12. Морозов, А.А. Энергосберегающие технологии в производстве титановых шлаков / А.А. Морозов, В.А. Резниченко // Титан. 2007. №1. С.15—20.
13. Гончаров, К.В. Одностадийный процесс прямого получения железа и титанованадиевого шлака из титаномагнетитовых концентратов и гидрометаллургическое извлечение ванадия из шлака: автореферат дис. ...канд. тех. наук / Гончаров Константин Васильевич. М., 2015. 22 с.

14. *Zhang, Shou-Rong*. The trends of ironmaking industry and challenges to chinese blast furnace ironmaking in XXI century / Shou-Rong Zhang // The 5th Int. Congr. on the Science and Technol. of Ironmaking (Shanghai, China). 2009. V.1. P.1—13.
15. *Chen, S.* Metalizing reduction and magnetic separation of vanadium titano-magnetite based on hot briquetting / S. Chen, M. Chu // Int. J. Miner. Metall. Mater. 2014. №21. P.225—233.
16. *Chen, S.* A new process for the recovery of iron, vanadium, and titanium from vanadium titanomagnetite / S. Chen, M. Chu // J. South. Afr. Inst. Min. Metall. 2014. №114. P.481—487.
17. *Васютинский, Н.А.* Титановые шлаки / Н.А. Васютинский. — М. : Металлургия, 1972. 208 с.
18. *Атмаджиди, А.С.* Обогащение чернового титаномagnetитового концентрата методом мокрой магнитной сепарации / А.С. Атмаджиди, К.В. Гончаров, Т.В. Олюнина, Г.Б. Садыхов // Цв. металлы. 2018. №9. С.19—24.
19. *Гончаров, К.В.* Восстановительный обжиг титаномagnetитового концентрата с получением титанованадиевого шлака, пригодного для последующего извлечения ванадия и титана / К.В. Гончаров, А.С. Агамирова, Т.В. Олюнина, Г.Б. Садыхов // Металлы. 2022. №4. С.3—9. — (К.В. Goncharov, A.S. Agamirova, T.V. Olyunina, G.B. Sadykhov, «Reduction Roasting of a Titanomagnetite Concentrate with the Formation of a Titanium–Vanadium Slag Suitable for the Subsequent Recovery of Vanadium and Titanium». Russian Metallurgy (Metally). 2022. №7. P.707—713.)
20. Смирнов, Л.А. Производство и использование ванадиевых шлаков / Л.А. Смирнов, Ю.А. Дерябин, А.А. Филиппенков, Ф.С. Раковский [и др.]. — М. : Металлургия, 1985. 126 с.
21. *Резниченко, В.А.* Искусственные титанаты / В.А. Резниченко, Г.А. Меняйлова. — М. : Наука, 1977. 136 с.
22. *Садыхов, Г.Б.* Поведение оксидных фаз при автоклавном кислотном разложении титанатных продуктов / Г.Б. Садыхов, В.А. Резниченко, И.А. Карязин, Л.О. Наумова // Металлы. 1998. №4. С.17—21.
23. *Садыхов, Г.Б.* Разработка научных основ и технологии комплексного использования титаномagnetитов с высоким содержанием диоксида титана : дис. ... докт. техн. наук / Садыхов Гусейнгулу Бахлул оглы. — Ин-т металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН. — М., 2001. 48 с.