

12. Смирнов М.В., Чеботин В.Н., Кудяков В.Я., Логинов Н.А. // Электрохимия. 1977. Т. 13, № 5. С. 754.
13. Ковалевский А.В., Сорока В.В. // Тез. докл. V Урал. конф. по высокотемпературной физической химии и электрохимии (Свердловск, 18–22 сент. 1989 г.). Свердловск: УрО АН СССР, 1989. Т. 1. С. 112.
14. Ковалевский А.В., Елькин О.В. // Журн. физ. химии. 2011. Т. 85, № 3. С. 570.

УДК 553.042/.045 + 546.(882 + 883)

НИОБИЙ И ТАНТАЛ: СОСТОЯНИЕ МИРОВОГО РЫНКА, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ, СЫРЬЕВЫЕ ИСТОЧНИКИ

Часть 2*

© 2014 г. **Е.Е. Никишина, Д.В. Дробот, Е.Н. Лебедева**

Московский государственный университет тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова

Статья поступила в редакцию 14.11.2012 г., подписана в печать 20.11.2012 г.

Ниобий и тантал – редкие тугоплавкие металлы, имеющие важное промышленное значение. Их запасы относят к «критическому» сырью, что приводит к необходимости оценки рисков, связанных с наличием первичных и техногенных сырьевых источников ниобия и тантала и влиянием этих факторов на предложения и спрос на эти металлы и их соединения с учетом традиционных и новых областей применения. Выполнен анализ мировых запасов ниобия и тантала, рассмотрена динамика изменения структуры сырьевой базы и технологических решений, реализованных и предлагаемых для их переработки. Описан современный рынок материалов на основе ниобия и тантала, указаны основные игроки на этом рынке, рассмотрены тенденции в изменении структуры потребления функциональных материалов на основе этих металлов.

Ключевые слова: ниобий, тантал, сырьевые источники, состояние рынка, области применения, основные минералы, ниобиевые и танталовые руды, мировое производство.

Niobium and tantalum are rare refractory metals having significant industrial importance. Their reserves are attributed to «critical» raw material, thus leading to the necessity of estimating the risks connected with primary and technogenic raw sources of niobium and tantalum and the effect of these factors on the proposals and demands for these metals and their compounds taking into account the traditional and new areas of application. The analysis of world's reserves of niobium and tantalum has been made. The dynamics of changing the raw material base structure and the technological solutions realized and proposed for their processing is considered. The modern market of materials on the basis of niobium and tantalum is described; the basic players in this market are specified; the trends in fluctuation of functional material consumption structure on the basis of these metals are considered.

Key words: niobium, tantalum, raw sources, state of the world market, fields of application, basic minerals, niobium and tantalum ores, world production.

СЫРЬЕВЫЕ ИСТОЧНИКИ НИОБИЯ И ТАНТАЛА

Содержание в земной коре ниобия составляет $2,0 \cdot 10^{-3} \%$, тантала – $2,5 \cdot 10^{-4} \%$ [2]. В природе в виде свободных металлов они не существуют. Известно

более 50 минералов ниобия и тантала, представленных в основном сложными оксидами (табл. 1) [3–5].

Имеются также минералы, представленные силикатами ниобия и тантала, но их количество весь-

* Часть 1 см. в [1].

Никишина Е.Е. – канд. хим. наук, доцент кафедры химии и технологии редких и рассеянных элементов Московского государственного университета тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова (119571, г. Москва, пр-т Вернадского, 86). E-mail: helena_nick@mail.ru.

Дробот Д.В. – докт. хим. наук, зав. этой кафедрой. Тел.: (495) 434-84-44. E-mail: dvdrobot@mail.ru.

Лебедева Е.Н. – канд. хим. наук, ст. науч. сотр. этой кафедры. Тел.: (495) 434-84-44. E-mail: rare214@mail.ru.

Таблица 1
Некоторые ниобий- и танталсодержащие минералы [3–5]

Минерал	Группа	Формула	Содержание, %	
			Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅
Колумбит-танталит	колумбит-танталитов	(Fe,Mn)(Nb,Ta) ₂ O ₆	25–60	20–50
Колумбит			40,5–76,6	0,8–41,5
Танталит			0,2–40	38,5–85,5
Тапиолит			5,36	80,19
Эвксенит			(Y,Ca,Ce)(Ti,Nb,Ta) ₂ O ₆	47,43
Воджинит		(Ta,Nb,Mn,Sn,Fe) ₂ O ₈	8,37	69,58
Пирохлор	пирохлора	(Na,Ca,Th,La) ₂ ·(Ti,Nb,Ta) ₂ O ₆ ·(OH,F)	50–71,5	≤4,0
Микролит			–	60–70
Стрюверит	рутила	(Ti,Ta,Fe)O ₂	≤42,7	≤36
Ильменорутил		(Ti,Nb,Fe ³⁺) ₃ O ₆	≤42	–
Иксиолит		(Ta,Nb,Sn,Mn,Fe)O ₂	8,30	68,96
Лопарит	перовскита	(Na,Ca,Sr,La)·(Ti,Nb,Ta)O ₃	5,0–12,5	~0,6
Луешит		NaNbO ₃	49–65	0,5–2,5

ма ограничено, они не имеют промышленного значения и далее не рассматриваются.

Колумбит-танталитная минеральная группа является наиболее важной группой ниобий- и танталсодержащих минералов. Примерно с 1955 г. большое значение как источник ниобия приобрели пирохлоровые руды.

В табл. 2 приведены основные месторождения ниобия и тантала. Более 96 % всех запасов ниобия приходится на пирохлоры и только 4 % — на колумбиты и колумбит-танталиты в гранитах, пегматитах и россыпях. Примерно 90 % ресурсов находятся в Бразилии, ~ 7 % — в Канаде [2, 3, 6].

Значительную долю (> 50 %) в используемом танталовом сырье составляют шлаки оловянных заводов (Таиланда, Малайзии, Нигерии, Заира и др.), содержащие 4–12 % Ta₂O₅, а также Nb₂O₅ — часто в больших количествах, чем Ta₂O₅ [3].

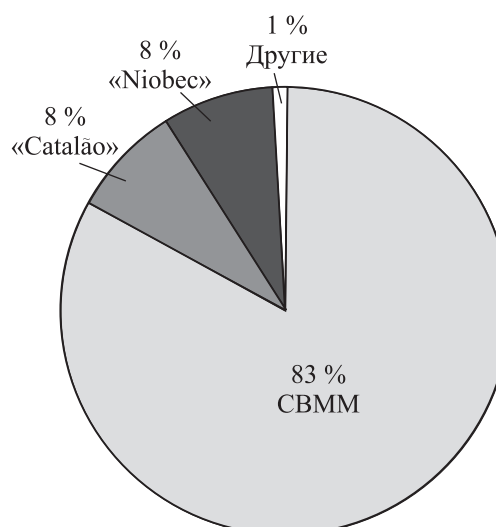
Основными мировыми производителями ниобия являются три компании — СВММ («Brazilian Company for Metallurgy and Mining», Бразилия), «Niobec» (IAMGOLD, Канада) и «Catalão» («Mineração Catalão de Goiás», Бразилия) [6, 7]. На рисунке представлены доли данных компаний на рынке производителей ниобия.

Согласно [8], запасов ниобия у СВММ хватит на 400 лет, у «Catalão» — на 20, у «Niobec» — на 18 лет.

По разведанным запасам ниобия Россия занима-

ет второе место в мире после Бразилии. В Государственном балансе числятся 32 месторождения [9]. В табл. 3 приведены промышленные типы ниобиевых месторождений РФ.

В России для получения Nb-концентрата разрабатываются два месторождения — Ловозерское (Мурманская обл.) и Татарское (Красноярский кр.). Минерально-сырьевая база ниобия способна в течение длительного времени обеспечивать рентабельное производство Nb-продукции в объемах,



Доли компаний – производителей ниобия на мировом рынке [7]

Таблица 2

Основные ниобиевые и танталовые месторождения

Месторождение	Компания, которой принадлежит месторождение	Страна
Ниобиевые месторождения		
Niobec	IAMGOLD	Канада
Oka	Niocan Inc.	Канада
Sokli	Yara International ASA	Финляндия
Araxá	CBMM	Бразилия
Catalão	Mineração Catalão de Goiás	Бразилия
Томторское		Россия
Lueshe		Конго
Ниобиевые и в меньшей степени танталовые месторождения		
Motzfeldt	Ram Resources Ltd.	Гренландия
Ilimaussaq	Greenland Minerals and Energy Ltd.	Гренландия
Ловозерское		Россия
Thor Lake	Avalon Rare Metals Inc.	Канада
Strange Lake	Quest Rare Minerals Ltd.	Канада
Pitinga	Parapanema	Бразилия
Ghurayyah	Tertiary Minerals Plc.	Саудовская Аравия
Kanyika	Globe Metals and Mining Ltd.	Малави
Танталовые и в меньшей степени ниобиевые месторождения		
Abu Dabbab	Gippsland Ltd.	Египет
Nuweibi	Gippsland Ltd.	Египет
Yichun	TiChun Tantalum & Niobium Mine	Китай
Greenbushes	Global Advanced Metals	Австралия
Wodgina	Global Advanced Metals	Австралия
Tanco	Cabot Corporation	Канада
Volta Grande	Belo Sun Mining Corp.	Бразилия
Kenticha	Ethiopian Mineral Development Share Company	Эфиопия
Morrua	Noventa Ltd.	Мозамбик
Marropino	Noventa Ltd.	Мозамбик

достаточных для удовлетворения потребности отечественной промышленности [9].

Россия экспортирует почти всю ниобиевую продукцию Соликамского магниевого завода (ОАО «СМЗ») — единственного потребителя лопаритового концентрата. Лопаритовый концентрат — специфический продукт, который получают только в РФ. Технология его переработки достаточно сложна из-за содержащегося в нем комплекса редких металлов (Nb, Ta, Ti, PЗЭ (редкоземельные элементы)). Концентрат радиоактивен: суммарная удельная радиоактивность находится на уровне 600 кБк/кг. Радиоактивность лопарита обусловлена в основном присутствием тория-232 (0,06—0,08 мас.%) и урана-238 (0,20 мас.%) [10, 11].

Основной метод обогащения танталониобиевых руд — гравитационный. Его результатом является черновой низкосортный концентрат, который доводят до кондиционного флотогравитацией, флотацией, электромагнитной и электростатической сепарацией. Ввиду радиоактивности возможно применять радиометрическую сепарацию. Сравнительно простые способы обогащения позволяют получать концентраты с содержанием лопарита до 95—96 % [2, 12]. В ОАО «СМЗ» реализована и с 1971 г. эксплуатируется не имеющая мировых аналогов технология хлорирования лопаритового концентрата в расплаве солей, обеспечивающая на первом этапе разделение труднолетучих хлоридов PЗЭ и низкокипящих хлоридов ниобия, тантала и титана. Технология внут-

Таблица 3

Промышленные типы ниобиевых и ниобий-танталовых месторождений России [9]

Промышленный тип месторождения	Минеральный тип руды	Основные компоненты (содержание в руде, %)	Попутные компоненты	Возможная конечная Nb-продукция	Месторождение (% к запасам РФ)	Степень пром. освоения месторождения
Месторождения в коренных породах						
Цериевоземельно-ниобий-танталовый в дифференцированных массивах апатитовых нефелиновых сиенитов	Лопаритовый	Nb ₂ O ₅ (0,20–0,40) Ta ₂ O ₅ (0,018–0,027) Ln ₂ O ₃ (0,9–1,4)	Ti, Sr, Th	Nb ₂ O ₅	Ловозерское (17,9)	Разрабатываемое
Ниобиевый в массивах ультраосновных щелочных пород и карбонатитов	Пироклоровый в карбонатитах	Nb ₂ O ₅ (0,2–0,4)	P, Ln, Ta, U, Zr	FeNb	Белозиминское (17,2)	Госрезерв
	Пироклоровый в микроклинитах	Nb ₂ O ₅ (0,3–1,2)	P, микроклин	FeNb	Неске-Вара (0,2) Больше-тагнинское	Госрезерв В Госбалансе не числится
Ниобий-танталовый в метасоматитах по гранитоидам щелочного ряда	Циркон-пироклор-колумбитовый	Nb ₂ O ₅ (0,12–0,40) Ta ₂ O ₅ (0,014–0,040) ZrO ₂ (0,3–0,7)	Ln, Li, Th, U, Hf, Rb, криолит	Nb ₂ O ₅	Улуг-Танзекское (21,3)	Госрезерв
					Зашихинское	В Госбалансе не числится
Редкоземельно-ниобий-танталовый в щелочных метасоматитах	Циркон-тантал-пироклоровый с фторидами редких земель	Nb ₂ O ₅ (0,20–0,40) Ta ₂ O ₅ (0,012–0,025) ZrO ₂ (1,5–1,6) Ln ₂ O ₃ (0,2–0,4)	Y, U, Th, Hf, Zn, Pb, криолит	Nb ₂ O ₅	Катугинское (14,1)	Подготавливаемое к освоению
Месторождения в корах выветривания						
Ниобиевый и редкоземельно-ниобиевый в корах выветривания карбонатитов в массивах ультраосновных щелочных пород	Апатит-пироклор-колумбитовый	Nb ₂ O ₅ (0,20–0,40) P ₂ O ₅ (10–16)	Ln, Ta, Fe	FeNb	Белозиминское (22,5)	Госрезерв
	Sr-, Ba-пироклоровый	Nb ₂ O ₅ (1,0–3,0)	Ln, Fe, P, Mn	Nb ₂ O ₅ , FeNb	Чуктуконское	В Госбалансе не числится
Ниобиевый в корах выветривания карбонатитов и щелочных метасоматитов зон региональных разломов	Пироклоровый, колумбит-пироклоровый	Nb ₂ O ₅ (0,4–0,8)	P, Fe, вермикулит	FeNb	Татарское (0,5)	Разрабатываемое
Скандий-редкоземельно-ниобиевый в перекристаллизованных корах выветривания карбонатитов	Монацит-Sr-, Ba-, Pb-пироклоровый	Nb ₂ O ₅ (4–8) Ln ₂ O ₃ (6–12) Y ₂ O ₃ (0,5–0,65) Sc ₂ O ₃ (0,05)	P ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅ , FeNb	Томторское (2,4)	Госрезерв

ренне самосогласована и обуславливает безреагентное разделение высших хлоридов ниобия, тантала и титана. Хлорная технология переработки лопарита обеспечивает извлечение 93—94 % Nb и 86—88 % Ti в технические оксиды [13]. Продукцией ОАО «СМЗ» являются пентаоксиды и пентахлориды ниобия и тантала. Доля СМЗ на мировом рынке чистого ниобия в 2010 г. составила 4,7 %, в объеме производства оксида ниобия в России — 100 % [14].

Владельцем лицензии на разработку Татарского месторождения является ОАО «Стальмаг». Компания «Северсталь» приобрела долю в «Стальмаге» для производства феррониобия, который получали из пироклорной руды Татарского месторождения алюмотермическим восстановлением, вводя в шихту железную руду [2, 15]. Однако в 2010 г. компания «Северсталь» приняла решение приостановить производство в ОАО «Стальмаг». В 2009 г. рентабельность по EBITDA¹ компании составляла 12,6 %, в 2010 г. она была отрицательной. Решение об остановке и слабый результат объясняются малым ростом цен на ниобий [16].

Текущие потребности нашей страны в ниобии удовлетворяются в основном за счет импорта. Россия импортирует феррониобий, скрытый импорт ниобия осуществляется также за счет закупок труб для нефтегазопроводов, изготовленных из сталей, легированных феррониобием [9].

В противоположность ниобию, запасы тантала расположены в большем числе стран — Бразилии, Австралии, Китае, России и т.д. [17]. Все Ta-месторождения традиционно разделяются на три группы по количественному отношению ниобия и тантала:

1) собственно танталовые — с содержанием $Nb_2O_5/Ta_2O_5 < 5$ и ведущей ролью тантала;

2) ниобий-танталовые — с $Nb_2O_5/Ta_2O_5 = 5-20$ и существенной ролью ниобия в стоимости конечной продукции;

3) ниобиевые, титановые и др., включающие Ta в качестве попутного компонента [18].

Собственно танталовыми месторождениями считаются месторождения, в составе руд которых тантал является ведущим полезным компонентом, а содержание в руде постоянно сопутствующего ниобия не превышает содержание тантала более чем в

5 раз. Из руд собственно танталовых месторождений получают высококачественные танталовые концентраты — танталитовые, микролитовые и др. с содержанием Ta_2O_5 от 25 до 60 %. Данная группа включает месторождения двух промышленных типов — танталоносных редкометалльных гранитных пегматитов и редкометалльных плюмазитовых гранитов. В мировой добыче тантала пегматитовые месторождения занимают лидирующее положение [18].

Из вероятных ресурсов тантала в пегматитах и связанных с ним россыпях находится 76 %; в гранитах, связанных с ними корах выветривания и россыпях — 8 %, аллювиальных, элювиальных и «древних» россыпях — 16 % [2]. В табл. 4 представлены мировые запасы тантала.

По величине промышленных запасов тантала, учтенных Госбалансом в 22 месторождениях, наша страна занимает первое место в мире. В России существуют четыре собственно танталовых месторождения — Орловское и Этыкинское (обрабатываемые), Вишняковское (подготовлено к освоению) и Алахинское (разведываемое). Кроме того, на государственном учете находятся месторождения, которые можно отнести к объектам освоения второй очереди. Их промышленное освоение в ближайшее время маловероятно, так как они имеют низкие геолого-экономические показатели, главным образом из-за неблагоприятного географо-экономического размещения. К числу таких месторождений относятся Гольцовое и Улуг-Танзекское [18].

Другими важными источниками тантала являются шлаки оловянной плавки при получении олова из россыпного касситерита пегматитового и отчасти грейзенового происхождения из Малайзии, Таиланда (экспортирует до 2000 т в год шлаков, содержащих

Таблица 4
Мировые запасы тантала [19]

Регион	Запасы Ta_2O_5	
	т	%
Южная Америка	129 274	41
Австралия	65 771	21
Китай и Южная Азия	33 112	10
Россия и Восточная Европа	31 298	10
Центральная Африка	28 576	9
Африка (кроме Центр. Африки)	21 318	7
Северная Америка	5 443	2
Европа	2 268	1

¹ EBITDA (от англ. Earnings before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization) — аналитический показатель, равный объему прибыли до вычета расходов по уплате налогов, процентов и начисленной амортизации.

12—13 % Ta_2O_5), Заира и Нигерии и т.д. Год 1954-й представляет собой важную веху в истории производства тантала — «Н.С. Starck» стала первой компанией в мире, которая начала производство танталовых концентратов из оловянных шлаков [20]. При обогащении оловянных руд попутно извлекается стрюверитовый концентрат с содержанием Ta_2O_5 от 7 до 12 %. Высокосортные оловянные шлаки (>10 % Ta_2O_5) используют непосредственно для извлечения тантала (и попутно ниобия); низкосортные предварительно обогащают с целью получения так называемого синтетического концентрата, содержащего 20—25 % Ta_2O_5 .

Высокая доля оловянных шлаков в балансе мирового производства тантала определяет зависимость ценообразования на танталовую продукцию от уровня мирового потребления и стоимости олова и его производных [20]. Цены на олово с 2006 по 2007 г. выросли с 8 тыс. долл. США за 1 т рафинированного металла до 15 тыс. долл. США, а затем до 20 тыс. долл. США во второй половине 2010 г. В ответ на повышение цен на олово производители открыли новые оловянные рудники и оловянные заводы, а также увеличили существующие мощности, в том числе в Австралии, Боливии, Канаде и Таиланде. В табл. 5 представлены данные о мировой добыче и ресурсах олова [21].

Таблица 5
Мировая добыча и ресурсы олова [21]

Страна-производитель	Производство, т		Ресурсы, т
	2010 г.	2011 г.	
Австралия	7 000	8 000	180 000
Боливия	20 200	20 700	400 000
Бразилия	11 000	12 000	590 000
Вьетнам	5 500	6 000	неизвестно
Индонезия	56 000	51 000	800 000
Китай	120 000	110 000	1 500 000
Конго (Киншаса)	6 700	5 700	неизвестно
Малайзия	1 770	2 000	250 000
Перу	33 800	34 600	310 000
Португалия	30	100	70
Россия	1 100	1 000	350 000
Таиланд	150	100	170 000
Другие страны	2 000	2 000	180 000
Всего	265 250	253 200	4 730 070

Россия обеспечена запасами олова в достаточном количестве. Но только в условиях высоких цен на олово разработка месторождений становится рентабельной, так как они находятся в труднодоступных местах Дальнего Востока и на большом расстоянии от производителей олова.

На долю шлаков оловянных заводов приходится 10 % танталового сырья. Первичные и вторичные концентраты занимают 60 и 10 % соответственно, вторичное сырье — 20 % [22].

ДОБЫЧА И ОБОГАЩЕНИЕ НИОБИЕВЫХ И ТАНТАЛОВЫХ РУД. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ НИОБИЯ И ТАНТАЛА

Месторождения ниобия и тантала разрабатывают открытым и закрытым способами. В первом случае разработку проводят в карьерах и применяют ее для месторождений, глубина залегания которых не превышает 100 м; она обычно дешевле и безопаснее. Этот способ включает вскрышные работы — удаление горных пород, залегающих над рудным телом, извлечение полезного ископаемого (буровзрывные работы, выемка руды экскаваторами), дальнейшую транспортировку руды на обогащение или накопление. Если же руда находится глубоко в земле, то используют закрытый (шахтный) способ добычи руды [23].

Ниобий и тантал получают преимущественно из колумбит-танталитовых, пироклоровых и лопаритовых руд. Плотность ниобий-танталовых минералов указанных руд составляет от 4,5 до 8,3 г/см³, поэтому основным методом обогащения этих руд является гравитационный, обеспечивающий эффективное отделение легких минералов пустой породы (кварца, полевых шпатов, кварцита и др.) от минералов ниобия и тантала [24]. Как правило, руды россыпных и коренных месторождений содержат сопутствующие тяжелые минералы: магнетит, рутил, ильменит, циркон, монацит, касситерит и др., а также часто встречающиеся минералы лития, бериллия, плотность которых близка к плотности минералов вмещающих пород (полевые шпаты, кварц) [24, 25]. Это определяет принципиальную необходимость разработки технологии комплексной переработки сырья, что является общим требованием при переработке полиметаллических руд, содержащих редкие и цветные металлы.

При обогащении пироклоровых руд следует учитывать их вещественный состав. Различают два основных типа руд: пегматитовые и карбонатитовые.

В первых ниобий находится преимущественно в виде пирохлора совместно с ильменитом, цирконом, часто с апатитом. Основным ниобиевым минералом карбонатитовых руд является пирохлор, а также встречаются его разновидности — коппит, бетафит, микроклин, гатчеттолит, часто содержится колумбит. Основные породообразующие минералы — кальцит, апатит. Пироклоровые пегматитовые руды с крупновкрапленными минералами ($>0,1$ мм) обогащаются гравитационным методом с последующей доводкой черновых концентратов [25, 26].

В схемах переработки пироклоровых карбонатитовых руд предусматриваются как гравитационные, так и флотационные процессы. Гравитационные процессы применяются при обогащении крупно- или средневкрапленных руд [25].

Эффективным решением удаления активности при переработке пироклоровых концентратов является использование процесса химического обогащения — алюмотермии — при производстве феррониобия на месте добычи руды. При этом образующийся шлак, в который переходит активность, возвращается в полости, образовавшиеся при подземной выработке [27, 28].

В последние годы возросла кустарная и мелко-масштабная добыча руды (ASM — от англ. Artisanal and Small Scale Mining), особенно в развивающихся странах [29]. ASM характеризуется слабой охраной труда, плохо обученным персоналом, использованием детского труда, неэффективностью добычи и переработки руды, низкими зарплатами персонала, неудовлетворительными экологическими показателями процессов.

Добыча полезных ископаемых в таких условиях привела к возникновению термина «конфликтные минералы». С 1995 по 2008 г. производство колумбит-танталового концентрата в Африке составляло 12–34 % от мирового производства. В связи с закрытием шахт в Австралии и Канаде в 2009 г., более 50 % мирового производства тантала приходится на Африку.

В 2009 г. Демократическая Республика Конго заработала более 1,0 млрд долл. США от продажи конфликтных минералов. По существующим оценкам, около 2 млн человек работают в этом секторе и около 10 млн человек зависят от доходов от продажи конфликтных минералов. В некоторых случаях доходы от ASM идут на поддержку вооруженных конфликтов [29]. Многие неправительственные и благотворительные организации (НПО) разрабатывают схемы,

направленные на уменьшение проблем ASM и продажи конфликтных минералов. Кроме того, некоторые крупные электронные компании отказываются от использования компонентов конфликтных минералов в своей продукции.

В табл. 6 представлено мировое производство концентратов, содержащих ниобий и тантал, в период с 2004 по 2009 г.

Рудные концентраты и шлаки, содержащие ниобий и тантал, перерабатывают на продукцию 5 типов [2, 3]:

- пентаоксиды (Nb_2O_5 , Ta_2O_5);
- пентахлориды ($NbCl_5$, $TaCl_5$);
- комплексные фториды (K_2NbF_7 , K_2TaF_7);
- феррониобий;
- танталовый порошок.

Технологические схемы можно классифицировать по способам разложения рудных концентратов на три группы [2, 3, 25]:

1. Щелочные способы — заключаются в сплавлении концентратов с щелочными реагентами ($NaOH$, KOH , Na_2CO_3 , K_2CO_3) или растворении в них, переводе ниобия и тантала в нерастворимые в воде полиниобаты и политанталаты натрия (при сплавлении с $NaOH$, Na_2CO_3) и растворимые ниобаты, танталаты калия (при сплавлении с KOH , K_2CO_3) и в получении технической смеси оксидов $(Nb,Ta)_2O_5$, которые далее поступают на операции разделения тантала и ниобия и выделения конечных продуктов — фтористых комплексных солей или оксидов каждого элемента. Данные способы сейчас уже не используются.

2. Кислотные способы — универсальны и в настоящее время являются доминирующими в мировой технологической практике. Их можно разделить на две подгруппы:

— разложение концентратов HF или смесью $HF + H_2SO_4$. Способ универсален и применим к концентратам любого типа, а также к шлакам оловянных заводов. В результате разложения ниобий и тантал извлекаются в раствор, из которого их разделяют (чаще всего экстракцией) и получают чистые конечные продукты;

— разложение концентратов H_2SO_4 или смесью $H_2SO_4 + (NH_4)_2SO_4$. Способ применяют для разложения минералов группы пирохлора и лопарита для разделения РЗЭ, титана, ниобия и тантала за счет различий в растворимости двойных сульфатов этих элементов. Ниобий и тантал извлекаются в сернокислые растворы, из которых в результате ряда пе-

Таблица 6
Мировое производство концентратов, содержащих ниобий и тантал [30, 31]

Страна	Минералы	Масса концентрата (до извлечения металла), т (содержание ниобия/содержание тантала, т/т)					
		2004 г.	2005 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.
Австралия	Колумбит-танталит	3610 (-/985)	3821 (-/854)	2140 (-/478)	1630 (-/441)	2060 (-/557)	318 (-/81)
Бразилия	Nb-минералы	168000 (39148/-)	247000 (39162/-)	206550 (48129/-)	245766 (57267/-)	246000 (58000/-)	247000 (58000/-)
	Ta-минералы	780 (-/148)	792 (-/216)	645 (-/176)	650 (-/180)	650 (-/180)	650 (-/180)
Бурунди		23 (5/5)	43 (8/9)	16 (3/3)	52 (10/9)	84 (16/16)	84 (16/16)
Канада	Nb-минералы	10800 (2516/-)	11100 (3710/-)	12500 (4157/-)	12900 (4337/-)	13150 (4383/-)	12900 (4330/-)
	Ta-минералы	253 (-/57)	282 (-/63)	249 (-/56)	201 (-/45)	150 (-/40)	110 (-/25)
Конго	Колумбит-танталит	74 (17/20)	124 (28/33)	52 (12/14)	267 (61/71)	380 (86/100)	330 (75/87)
	Nb-минералы	— (-/—)	— (-/—)	— (-/—)	— (-/—)	240 (120/-)	180 (90/-)
Эфиопия	Танталит	71 (7/45)	93 (9/49)	109 (11/57)	117 (12/52)	83 (8/37)	83 (8/38)
Мозамбик		712 (87/205)	281 (20/81)	95 (7/27)	196 (14/56)	396 (28/110)	405 (29/113)
Нигерия	Колумбит-танталит	100 (40/5)	110 (45/5)	900 (387/10)	450 (180/20)	500 (194/25)	450 (180/20)
Руанда		220 (69/49)	276 (87/68)	188 (59/46)	490 (150/120)	490 (150/120)	430 (130/104)
Примечание. В таблице не указаны Сомали, Уганда, Боливия, Китай, Французская Гвинея, Казахстан и Россия. Данные страны являются производителями ниобиевого и танталового концентратов, однако либо их доля в мировом производстве незначительна, либо не имеется доступной адекватной информации, позволяющей оценить уровень и долю в мировом производстве.							

ределов получают индивидуальные соединения элементов или смеси оксидов ниобия и тантала.

3. Хлорирование сырья — используют для разложения лопарита, разделяют на две подгруппы:

— хлорирование в присутствии углерода (уголь, кокс) с получением конденсата хлоридов и оксихлоридов ниобия и тантала; применимо и для шлаков оловянных заводов;

— хлорирование феррониобия (или ферротантала-ниобия) с получением конденсата пентахлоридов

ниобия и тантала, которые можно разделить ректификацией или переработать с получением других соединений. Данный способ используют и при переработке некондиционных электролитических конденсаторов для извлечения ниобия и тантала.

Технология хлорирования позволяет извлекать из перерабатываемого сырья ценные составляющие, получать их в форме, удобной для дальнейшей переработки, тонкой очистки соединений, производства индивидуальных металлов, сплавов и лигатур. При

этом если осуществить возврат хлора на начальные стадии технологического цикла, то можно создать малоотходные процессы, замкнутые по основному компоненту [12, 32]. Хлориды высокой степени чистоты применяют в качестве прекурсоров в процессах управляемого синтеза широкого спектра функциональных материалов (см. часть 1 [1]).

Задача получения чистых компактных металлов осложняется тем, что при высоких температурах ниобий и тантал поглощают газы (O_2 , N_2 , H_2 и др.). Это делает их хрупкими, что отрицательно сказывается на их дальнейшей механической обработке. Поэтому операции завершающих стадий спекания порошков и переплавки металлов для окончательного рафинирования и дегазации проводят в вакууме, что осложняет технологию и аппаратурное оформление процессов [2].

Существуют следующие способы получения металлических ниобия и тантала [2, 3]:

1) восстановление оксидов: а) карботермический способ; б) металлотермические способы (восстановление алюминием, кальцием);

2) восстановление простых или комплексных галогенидов: а) металлотермические способы; б) восстановление водородом;

3) электролитические способы получения и рафинирования металлов.

ПЕРСПЕКТИВЫ РОСТА МИРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА НИОБИЯ И ТАНТАЛА

Мировое производство ниобия быстро растет. Это объясняют увеличением потребления высокопрочной низколегированной стали, применяемой в производстве автомобилей и нефтегазоперерабатывающего оборудования. Кроме того, повышение спроса на ниобий можно связать с его использованием в мобильных телефонах, жаропрочных сплавах, функциональной и конструкционной керамике и т.д.

Спрос на тантал обусловлен в основном электронной промышленностью. Некоторое сокращение выпуска Та-продукции было вызвано временным закрытием шахт «Wodgina» и «Greenbushes» в Западной Австралии, которое было связано с необходимостью технического обслуживания, а также падением цен на тантал в результате экономического спада и возобновления вооруженного конфликта в Конго (в отличие от производства ниобия, тантал гораздо более распространен в Африке, преимущественно

Руанде и Конго, на которые приходится свыше 60 % мирового танталового производства).

И хотя в апреле 2011 г. компания «Global Advanced Metals» сообщила о начале работы на рудниках «Wodgina» и «Greenbushes» [33], Европейская комиссия считает, что существует потенциальный риск дефицита поставок ниобия и тантала, который может оказать существенное влияние на экономику ЕС. В связи с этим предлагаются стратегии, предусматривающие открытие новых шахт, повышение эффективности использования ресурсов и увеличение доли вторичного сырья [34].

В табл. 7 представлены некоторые ниобиевые и танталовые проекты мировых производителей, связанные с ростом производства или открытием новых шахт.

Еще одним решением проблемы дефицита ресурсов ниобия и тантала является переработка вторичного сырья. Вторичное Nb-содержащее сырье представлено отходами производства и применения ниобия и его сплавов. Это металлические отходы и брак при производстве штабиков, слитков и проката; отходы сверхпроводящих сплавов, содержащих ниобий, и жаропрочных Nb-содержащих сплавов и сталей; лом и отходы конденсаторов и твердых сплавов [46]. Ниобий в основном извлекают из ниобиевых сталей, жаропрочных сплавов и конденсаторов; его количество, получаемое из других источников, незначительно, что связано с большими запасами ниобия в мире. На предприятиях электронной промышленности при производстве и эксплуатации электролитических ниобиевых конденсаторов образуется значительное количество отходов в виде брака готовых изделий и амортизационного лома. Содержание ниобия в них составляет 8,0–37,5 %, тантала — до 4,5 %, остальное — Fe, Cu, Mn, Ni, Pb, Sn, Si, C. Основные способы переработки отходов конденсаторов — гидрометаллургический и хлорирование [47].

Стоимость тантала является движущей силой для его утилизации, поэтому вторичных Та-источников больше — к ним относятся Та-конденсаторы, карбиды, применяемые для изготовления мелющих и режущих инструментов, сплавы, мишени напыления, трубы, теплообменники, обрезки и стружка металлургических процессов и т.д. Более 60 % всего тантала идет на производство конденсаторов, которое включает несколько стадий. На каждом этапе производители проводят тесты электронных характеристик конденсаторов, отбракованные изделия

Таблица 7

Ниобиевые и танталовые проекты

Страна	Компания	Проект, месторождение	Описание	Ссылка
Австралия	Global Advanced Metals	Wodgina	Продолжены работы в 2012 г. Производство Ta ₂ O ₅ – 318 т/год	[33]
Гренландия	Ram Resources Ltd.	Motzfeldt	Ресурс – 500 млн т Содержание: Nb ₂ O ₅ – 0,13–0,15 % Ta ₂ O ₅ – 0,011–0,013 % Сопутствующие продукты – оксиды PЗЭ	[35]
Египет	Gippsland Ltd.	Abbu Dabbab	Танталооловянное месторождение Ресурс – 44,5 млн т Содержание: Ta ₂ O ₅ – 0,025 % Планируется выпуск с 2013 г. 300 т/год Ta ₂ O ₅	[36]
		Nuweibi	Танталооловянное месторождение Ресурс – 98 млн т Содержание: Nb ₂ O ₅ – 0,0095 %; Ta ₂ O ₅ – 0,014 %	[37]
Канада	Commerce Resources	Upper Fir	Ресурс – 36,4 млн т Содержание: Nb ₂ O ₅ – 0,17 %; Ta ₂ O ₅ – 0,019 % Начало работ – лето 2012 г.	[38]
	Les Mineraux Crevier	Anita	Ресурс – 23,75 млн т Содержание: Nb ₂ O ₅ – 0,186 %; Ta ₂ O ₅ – 0,019 % Шахта начнет производство в 2012–2013 гг. Запасов хватит на 18 лет	[39]
	MDN Inc.	Crevier	Ресурс – 25,4 млн т Содержание: Nb ₂ O ₅ – 0,2 %; Ta ₂ O ₅ – 0,023 % Окончание технико-экономического обоснования проекта – во 2-й половине 2012 г.	[40]
Кения	Pacific Wildcat	Mrima Hill	Ресурс – 105,3 млн т Содержание: Nb ₂ O ₅ – 0,65 %, а также PЗЭ Проводятся работы по исследованию месторождения	[41]
Малави	Globe Metals and Mining Ltd.	Kanyika	Ресурс – 60 млн т Содержание: Nb ₂ O ₅ – 0,41 %; Ta ₂ O ₅ – 0,018 % Ввод в производство в 2013 г. Ожидаемый объем к 2015 г. – 4,5 тыс. т FeNb, или 3 тыс. т/год металлического Nb Побочные продукты – оксиды Ta, U, Zr	[42]
Мозамбик	Noventa	Marropino	Ресурс – 7,4 млн т Содержание: Ta ₂ O ₅ – 0,023 % Запланирован в 2012 г. рост пр-ва Ta с 200 тыс. фунт/год до 600 тыс. фунт/год за счет строительства нового перерабатывающего завода	[43, 44]
		Mogua	Начало геологических исследований и предварительного технико-экономического анализа – 2-й квартал 2012 г. Строительство перерабатывающего завода – 4-й квартал 2012 г.	[45]

изымаются и подвергаются переработке. Тенденция к миниатюризации конденсаторов приводит к использованию меньшего количества тантала и увеличению количества труда, необходимого для

восстановления тантала при переработке отходов. Объем восстановленного материала трудно вычислить, поскольку этот вид утилизации децентрализован. Значительная доля Ta-конденсаторов в гото-

вых электронных устройствах (таких, как мобильные телефоны и персональные компьютеры) также является вторичным сырьем. Отработанные устройства отправляют в Азию, где их разбирают вручную. Операторы извлекают все компоненты, включая Та-конденсаторы. Их, в свою очередь, перерабатывают и восстанавливают металлический тантал для последующей продажи. Переработка конденсаторов довольно трудна, и ее современная технология развита слабо, поскольку тантал легко окисляется и во время пирометаллургических процессов может перейти в шлак. Кроме того, утилизация компьютеров сложна из-за большого количества вторичных материалов, некоторые из которых представляют экологические проблемы при переработке. [34, 48—50]. Компания «H.C. Starck» является лидером на мировом рынке переработки и утилизации отходов тантала [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ приведенной выше совокупности данных позволяет констатировать, что:

1. Номенклатура областей применения ниобия, тантала и функциональных материалов на их основе динамично расширяется, и эта тенденция устойчива. Роль относительно малотоннажных продуктов, используемых в наиболее высокотехнологичных секторах промышленного производства, неуклонно возрастает симбатно с наиболее значимыми достижениями неорганического материаловедения, теории каталитических процессов, химии оптически активных материалов и т.д.

2. Потребление в России ниобийсодержащих продуктов — феррониобия, оксида ниобия — неоправданно мало, и это ставит РФ в технологическую зависимость от стран, производящих трубы большого диаметра северного исполнения из низколегированных сталей. Скрытый импорт ниобия может быть сокращен, а зависимость ослаблена при освоении технологий производства этой продукции, востребованность которой в ближайшей и среднесрочной перспективе сомнений не вызывает.

3. Представляется важной, технологически оправданной и экономически целесообразной задачей вовлечения новых сырьевых источников ниобия и тантала в промышленное использование. В этом случае возможны производство импортзамещающих материалов и освоение существенно новых классов функциональных материалов на основе этих металлов.

4. Динамика изменения цен на ниобий- и танталсодержащие материалы зависит (как и для всех редких элементов) от очень большого числа разнонаправленных параметров и подвержена существенным колебаниям. В анализируемом случае можно выделить некоторый «коридор» цен и объемов производства, выход за который ограничен механизмом самоорганизации процессов производства и потребления продукции на основе этих металлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никишина Е.Е., Дробот Д.В., Лебедева Е.Н. // Изв. вузов. Цв. металлургия. 2013. № 5. С. 28.
2. Зеликман А.Н., Коршунов Б.Г., Елютин А.В. Ниобий и тантал. М.: Металлургия, 1990.
3. Коровин С.С., Дробот Д.В., Федоров П.И. Редкие и рассеянные элементы. Химия и технология: Учеб. для вузов. Кн. II / Под ред. С.С. Коровина. М.: МИСИС, 1999.
4. Mineralogy Database // URL: <http://webmineral.com/> (дата обращения 01.10.2012).
5. Горная энциклопедия // URL: <http://www.mining-enc.ru/> (дата обращения 01.10.2012).
6. Tither G. Progress in niobium markets and technology 1981—2001 // CBMM. URL: <http://www.cbmm.com> (дата обращения 01.10.2012).
7. Niobium 101. URL: <http://www.iamgold.com/English/Operations/Operating-Mines/Niobec-Niobium-Mine/Niobium-101/default.aspx> (дата обращения 01.10.2012).
8. Vulcan T. Niobium or Columbium? URL: http://www.mdn-mines.com/pdf/revue_de_presse/media_juin2010.pdf (дата обращения 01.10.2012).
9. Потанин С.Д., Калиш Е.А., Рябкин В.К. // Минер. сырье. 2006. № 18. С. 26.
10. Петров И.М. Редкий ниобий на редкоземельном рынке // Новые рынки. 2001. № 3—4. URL: http://www.promved.ru/august_2001_03.shtml (дата обращения 01.10.2012).
11. Мельник Н.А. Радиогеоэкологические проблемы эксплуатации редкометалльных месторождений // Инновационный потенциал Кольской науки. URL: http://www.kolasc.net.ru/russian/innovation_ksc/3.21.pdf (дата обращения 01.10.2012).
12. Дробот Д.В., Чуб А.В., Крохин В.А., Мальцев Н.А. Проблемы применения хлорных методов в металлургии редких металлов. М.: Металлургия, 1991.
13. Зеликман А.Н., Коршунов Б.Г. Металлургия редких металлов. М.: Металлургия, 1991.
14. Годовой отчет открытого акционерного общества «Соликамский магниевый завод» за 2010 г. URL:

- смз.рф/report/2010/godovoj_otchet_za_2010_god.pdf (дата обращения 01.10.2012).
15. *Рысс М.А.* Производство ферросплавов. М.: Металлургия, 1985.
 16. *Асанкин Р.* «Северсталь» разочаровалась в ниобии // Коммерсантъ-Online. 04.05.2011. URL: <http://www.kommersant.ru/doc/1635044/print> (дата обращения 01.10.2012).
 17. *Vulcan T.* Tantalum: a modern metal, Actually. URL: <http://www.hardassetsinvestor.com/interviews/1376-tantalum-a-modern-metal-actually.html?showall=&fullart=1&start=6> (дата обращения 01.10.2012).
 18. *Рябцев В.В., Калиш Е.А., Голованов О.Г.* // Минер. сырье. 2006. № 18. С. 40.
 19. *Schwela U.* // TIC Bulletin. 2011. № 145. P. 2.
 20. Tantalum and Niobium — the keys to the markets of the future. URL: http://www.eng.lbl.gov/~dw/projects/DW4118_Oven_88/Refractory%20Mat'ls/tantalum_and_niobium.pdf (дата обращения 01.10.2012).
 21. Tin // Statistics and Information. US Geological Survey. 2012. URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/tin/mcs-2012-tin.pdf> (дата обращения 01.10.2012).
 22. *Sivaramakrishnan A.* // IMRE J. 2001. Vol. 5, № 1. P. 13.
 23. Разработка рудных месторождений. URL: <http://www.starkmanrealtors.com/index.html> (дата обращения 01.10.2012).
 24. Химия и технология редких и рассеянных элементов: Учеб. пос. Т. 3. / Под ред. К.А. Большакова. М.: Высш. шк., 1976.
 25. *Маслов А.А., Оствальд Р.В., Шагалов В.В.* и др. Химическая технология ниобия и тантала. Томск: Изд-во Томск. политех. ун-та, 2010.
 26. Геологический словарь. В 2-х т. / Под ред. К.Н. Паффенгольца и др. М.: Недра, 1978.
 27. *Faria Sousa C.A.* The evolution of FeNb manufacturing. URL: http://www.cbmm.com.br/portug/sources/techlib/science techno/table_content/sub_1/images/pdfs/006.pdf (дата обращения 01.10.2012).
 28. *Dufresne C., Goyette G.* The production of ferroniobium at the Niobec mine. URL: http://www.cbmm.com.br/portug/sources/techlib/science techno/table_content/sub_1/images/pdfs/start.pdf (дата обращения 01.10.2012).
 29. *Dorner U., Franken G., Liedtke M., Sievers H.* Artisanal and Small-Scale Mining (ASM). URL: http://www.polinares.eu/docs/d2-1/polinares_wp2_chapter7.pdf (дата обращения 01.10.2012).
 30. *Rapp J.F.* Niobium (Columbium) and Tantalum (Advance Release) // U.S. Geological Survey Minerals Yearbook. 2007. URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/niobium/myb1-2007-niobi.pdf> (дата обращения 01.10.2012).
 31. *Rapp J.F.* Niobium (Columbium) and Tantalum (Advance Release) // U.S. Geological Survey Minerals Yearbook. 2009. URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/niobium/myb1-2009-niobi.pdf> (дата обращения 01.10.2012).
 32. *Дробот Д.В., Буслаева Т.М.* // Рос. хим. журн. 2001. Т. 45, № 2. С. 46.
 33. Tantalum ore Processing Recommences at Wodgina. URL: http://www.globaladvancedmetals.com/media/15037/global%20advanced%20metals_tantalum%20ore%20processing%20recommences%20at%20wodgina.pdf (дата обращения 01.10.2012).
 34. Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. European Commission. URL: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/pc-contributions/org-050-tantalum-niobium-international-study-center-tic_en.pdf (дата обращения 01.10.2012).
 35. Motzfeldt Project // Ram Resources Ltd. URL: <http://www.ramresources.com.au/motzfeldt.asp> (дата обращения 01.10.2012).
 36. Abu Dabbab Tantalum // Gippsland Ltd. URL: <http://www.gippslandltd.com/Projects/AbuDabbab.aspx> (дата обращения 01.10.2012).
 37. Nuweibi — Tantalum, Niobium, Feldspar (Gippsland 50 %) // Gippsland Ltd. URL: <http://www.gippslandltd.com/Projects/Nuweibi.aspx> (дата обращения 01.10.2012).
 38. Blue River Tantalum-Niobium Project. Upper Fir // Commerce Resources Corp. URL: <http://www.commerceresources.com/s/UpperFir.asp> (дата обращения 01.10.2012).
 39. Anita Project Niobium-Tantalum Mine, Canada // Mining Technology. URL: <http://www.mining-technology.com/projects/anita-project/> (дата обращения 01.10.2012).
 40. Crevier // MDN Inc. URL: <http://www.mdn-mines.com/en/operations/quebec/crevier/> (дата обращения 01.10.2012).
 41. Mrima Hill // Pacific Wildcat Resources Corp. URL: <http://www.pacificwildcat.com/mrimahill.html> (дата обращения 01.10.2012).
 42. Kanyika Niobium Project // Globe Metals and Mining. URL: <http://www.globemetalsandmining.com.au/projects/kanyika-niobium-project> (дата обращения 01.10.2012).
 43. Ashcroft J. Noventa: Marropino's tantalum output boosted after intense period of commissioning // Proactiveinvestors. URL: <http://www.proactiveinvestors.co.uk/companies/news/27087/noventa-marropinos-tantalum-output-boosted-after-intense-period-of-commissioning-27087.html> (дата обращения 01.10.2012).

44. Noventa Provides Update on Progress at Marropino // CNW. URL: <http://www.newswire.ca/en/story/914729/noventa-provides-update-on-progress-at-marropino> (дата обращения: 01.10.2012).
45. Marropino// Noventa. URL: http://www.noventagroup.com/?page_id=25 (дата обращения 01.10.2012).
46. Колобов Г.А., Елютин А.В. Вторичный ниобий. Переработка ниобийсодержащих металлических отходов // *Металлургия. Наукові праці Запорізької державної інженерної академії*. 2010. № 21. URL: http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Metalurg/2010_21/pdf/METALURG_21_8.pdf (дата обращения 01.10.2012).
47. Колобов Г.А., Елютин А.В. Вторичный ниобий // Там же. 2011. № 23. URL: http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Metalurg/2011_23/pdf/METALURG_23_11.pdf (дата обращения 01.10.2012).
48. Mineralogy Database // URL: <http://webmineral.com/> (дата обращения 01.10.2012).
49. Hagelüken C., Meskers C. // Proc. Joint Intern. Congr. and Exhib. «Electronics Goes Green 2008» (Germany, 7–10 Sept. 2008). P. 623. URL: <http://www.preciousmetals.unicore.com/PMR/Media/e-scrap/miningOurComputers.pdf> (дата обращения 01.10.2012).
50. Meskers C., Hagelüken C. The impact of different preprocessing routes on the metal recovery from PCs. URL: <http://www.preciousmetals.unicore.com/PMR/Media/e-scrap/impactOfDifferentPreprocessing.pdf> (дата обращения 01.10.2012).

УДК 669.2 : 669.054.8

ТЕХНОЛОГИИ ВТОРИЧНЫХ ТУГОПЛАВКИХ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

Обзор

© 2014 г. Г.А. Колобов, В.С. Панов, Н.Н. Ракова

Запорожская государственная инженерная академия (ЗГИА), г. Запорожье, Украина
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

Статья поступила в редакцию 03.06.2013 г., подписана в печать 13.08.2013 г.

Приведен краткий обзор работ А.В. Елютина с его сотрудниками в области редких металлов. Рассмотрены технологии извлечения циркония, гафния, вольфрама, тантала и ниобия из различных видов вторичного сырья: металлических отходов, лома огнеупоров, отходов и лома твердых сплавов, амортизационного лома конденсаторов. Показаны возможности повышения чистоты этих металлов методами электролитического рафинирования и электронно-лучевой плавки.

Ключевые слова: цирконий, гафний, вольфрам, тантал, ниобий, вторичное сырье, технологии извлечения, электролитическое рафинирование, электронно-лучевая плавка.

A brief review of A.V. Yelutin's and his coworkers' works in the field of rare metals is given. Zirconium, hafnium, tungsten, tantalum and niobium extraction processes from various types of recycled materials: scrap metal, scrap refractory materials, waste and scrap of hard metal, dormant scrap of capacitors are considered. The opportunities of improving the purity of these metals by electrolytic refining and electron-beam melting are shown.

Key words: zirconium, hafnium, tungsten, tantalum, niobium, secondary raw materials, extraction process, electrolytic refining, electron-beam melting.

Панов В.С. – докт. техн. наук, профессор кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий МИСиС (119049, г. Москва, В-49, Ленинский пр-т, 4). Тел.: (495) 638-46-42. E-mail: zeinalova@rambler.ru.

Ракова Н.Н. – канд. техн. наук, профессор кафедры металлургии цветных, редких и благородных металлов МИСиС. Тел.: (495) 647-23-32.

Колобов Г.А. – канд. техн. наук, акад. Академии инж. наук Украины, профессор кафедры металлургии ЗГИА (69006, Украина, г. Запорожье, пр. Ленина, 226). Тел.: (+10-380-612) 23-85-17. E-mail: kolobovgerman@rambler.ru.