

Таблица 1. Энергии активации и лимитирующие стадии

	Энергия активации	Лимитирующая стадия
Экстракция иттрия	16,2±1,3 кДж/моль	Диффузия
Экстракция железа	11,4±1,2 кДж/моль (Т > 305 К)	Диффузия
	40,0±1,4 кДж/моль (Т < 300 К)	Химическая реакция

гается к 2–3 минутам, тогда как железо требует 15 минут.

Таким образом, для успешного разделения иттрия и железа экстракцию необходимо вести при температуре до 300 К, когда лимитирующие стадии различны. В таких условиях степень извлечения железа снижается до 7–10 %, тогда как степень извлечения иттрия достигает 80 %, а коэффициент разделения элементов превышает значение 23.

При твердофазной экстракции ни температура, ни интенсивность перемешивания не влияют на эффективность извлечения, однако повышение температуры до 330 К позволяет сократить время контакта фаз, необходимое для достижения равновесия экстракции, с двух ча-

сов до одного. Степень извлечения в 80 % достигается при соотношении экстрагента к водной фазе $m_{\text{ТВЭК}}/V = 1:10$. Энергия активации для твердофазной экстракции составила 18,5±2,0 кДж/моль, что говорит о том, что лимитирующей стадией является диффузия частиц в зерне.

При твердофазной экстракции наблюдается небольшое снижение степеней извлечения иттрия и железа в сравнении с жидкофазной экстракцией. Это объясняется тем, что длинные и разветвленные алкильные радикалы экстрагента путаются в сетчатой структуре матрицы, что, в свою очередь, препятствует формированию комплексов и приводит к некоторому снижению эффективности твердофазной экстракции.

Список литературы

1. U. S. Geological Survey, *Mineral commodity summaries*, 2023. – 210 p.
2. European Commission, *Study on the EU's list of Critical Raw Materials*, 2020. – 157 p.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТИТАНА, ЦИРКОНИЯ И ВАНАДИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЛЕГИРОВАННОГО ПЛАВЛЕННОГО ГЛИНОЗЕМА

Л. Н. Малютин¹, А. Д. Киселев¹, А. А. Смороков²

¹ООО «Институт Легких Материалов и Технологий» (ООО «ИЛМуТ») 119049, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 6, стр. 21, Lev.Malyutin@rusal.com

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет 634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, д. 30, aas19@tpu.ru

Основными областями применения легированных плавленных глиноземов являются огнеупорная и абразивная промышленность. Плавленные глиноземы получают путем переплавки глиноземистых материалов в электродуговых рудотермических печах с дальнейшим дроблением кристаллизованных слитков и рассевом корундового зерна и порошков [1, 2]. Наибольшее распространение получил плавленный глинозем, производимый из бокситов, – нормальный электрокорунд. Данный материал имеет ряд преимуществ перед корундами, получаемыми из металлургического глинозема: нормальный корунд обладает большей абразивной способ-

ностью, твердостью и вязкостью за счет наличия в своем составе титана и отсутствия оксида натрия (щелочности) [1–3]. Изготавливают данный электрокорунд исключительно из высококачественных бокситов с низким содержанием кальция, магния, кремния и железа. Наличие кальция и магния в боксите приводит к образованию алюминатов, критически снижающих абразивные и огнеупорные свойства плавленных глиноземов [1, 2]. Наличие большего количества железа и кремния в бокситах приводит к усложнению технологического передела и дополнительным энергетическим затратам на производство побочного продукта – ферросилиция

Таблица 1. Состав лейкоксенового концентрата, % масс.

TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	ZrO ₂	V ₂ O ₅	MnO	MgO
59,8	30,1	4,4	2,8	0,9	0,8	0,5	0,4	0,3

[1, 2]. Мировые запасы высококачественного бокситового сырья ограничены, поэтому востребованным становится аналог нормального электрокорунда – титанистый плавленый глинозем. Титанистый корунд получают из металлургического глинозема, плавку осуществляют с добавлением титансодержащих материалов [1, 2]. Наиболее доступными источниками титана являются ильменитовый и лейкоксеновый концентраты. Химический состав концентрата, использованного в исследовании, приведен в таблице 1. Основными минералами, слагающими концентрат, являются лейкоксен (Fe₂Ti₃O₉), рутил (TiO₂), ильменит (FeTiO₃), алюмохромит (Fe(Al, Cr)₂O₄), кварц (SiO₂), хромит (FeCr₂O₄) и циркон (ZrSiO₄).

В шихту перед плавкой добавляют восстановитель (кокс, антрацит), необходимый для перемещения железа и кремния в фазу металла; при этом происходит восстановление оксидов титана и ванадия. Цирконий, хром и ванадий, наряду с титаном, являются легирующими элементами для корунда, улучшающими его прочностные и абразивные характеристики [1, 2]. Установление условий восстановления высших оксидов легирующих элементов до полуторных оксидов, обеспечивающих максимальную степень перехода полуторных оксидов в фазу корунда, являлось целью экспериментальной работы.

Известно, что в промышленности используют титанистый плавленый глинозем, содержа-

щий 2,2–3,5 % масс. TiO₂ [1–3]. Следовательно, расход лейкоксенового концентрата для выплавки корунда составил 0,5 кг на 10 кг глинозема, что соответствует массовой доле TiO₂ ~ 3 % в шихтовой композиции. Расход восстановителя (антрацита) варьировали в диапазоне 0,5b–1,5b с шагом 0,25b, где b – стехиометрически необходимое количество углерода для восстановления всего количества железа и кремния, содержащегося в лейкоксеновом концентрате (на 1 кг концентрата ~ 85 г антрацита).

Экспериментально установлено, что корунд с массовой долей TiO₂ ~ 2,9 % образуется при расходе восстановителя в количестве 1b (стехиометрически необходимом количестве). Корунд, полученный в данных условиях также содержит, % масс.: 0,04 ZrO₂, 0,04 Cr₂O₃, 0,02 V₂O₅. Металл представляет собой сплав железа и кремния (ферросилиций) и концентрируется в нижней части слитка. Недостаток антрацита (0,5b и 0,75b) приводит к появлению избыточного количества железа и кремния в фазе корунда. Избыток восстановителя (1,25b и 1,5b) приводит к перевосстановлению легирующих оксидов и переходу титана, хрома и ванадия в металлическое состояние. Помимо этого, происходит образование карбида (TiC), нитрида (TiN) титана и сульфида циркония (ZrS), концентрирующихся в корундовой фазе.

Список литературы

1. Гаршин А. П. *Материаловедение в 3 т. Том 1. Абразивные материалы.* – М.: Издательство Юрайт, 2020. – 214 с.
2. Полубелова А. С. *Производство абразивных материалов.* – Л.: Машиностроение, 1968. – 180 с.
3. Наерман М. С. *Справочник молодого шлифовщика.* – М.: Высшая школа, 1985. – 207 с.