

УДК 621.74

Поступила 10.05.2017

## ЭРБИЙ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНИКЕ ERBIUM AND ITS APPLICATION IN MODERN TECHNOLOGY

*А. В. ВАСИЛЬЕВА, А. А. ГЕТЬМАН, Военно-морской политехнический институт,  
г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a.a.getman.mail.ru*

*A. V. VASILYEVA, A. A. GETMAN, Naval Polytechnic Institute, Saint-Petersburg, Russia.  
E-mail: a.a.getman.mail.ru*

*Эрбий используют в качестве компонента магнитных сплавов; оксид эрбия применяется в ядерной энергетике для улучшения энергораспределения и безопасности работы ядерного реактора.*

*Erbium is used as a component of magnetic alloys; oxide of erbium is used in nuclear power to improve energy distribution and safe operation of a nuclear reactor.*

**Ключевые слова.** Борат, стержни реактора, поглощение нейтронов, криокуляры.

**Keywords.** Borate, reactor cores, neutron absorption, cryocooler.

Эрбий относится к лантаноидам, которые встречаются очень редко. Входит в состав таких минералов, как ксенотим, бастнезит, монацит, эвксенит, лопарит. Их месторождения в США, Казахстане, России, Украине, Австралии, Бразилии, Индии, Скандинавии.

Эрбий – белый (серебристо-белый) металл. Содержание в земной коре –  $3,3 \cdot 10^{-4}$  мас.%, в морской воде –  $6 \cdot 10^{-7}$  мг/л. Гексагональная решетка с параметрами:  $a = 0,35588$  нм и  $c = 0,55874$  нм. Температура плавления – 1522 °С, температура кипения – 2510 °С. Вместе с лютецием и тулием эрбий принадлежит к числу самых тяжелых лантаноидов – его плотность больше  $9$  г/см<sup>3</sup>. Легко поддается механической обработке [1]. Кроме розовой окраски большинства соединений, в том числе оксида Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, эрбий почти ничем не отличается от прочих лантаноидов иттриевой группы, несколько большие прочность и твердость выделяют этот элемент среди других лантаноидов. Предел прочности эрбия на сжатие – 780 МПа [1].

Эрбий из природной смеси редкоземельных элементов выделяют методами экстракции и хроматографии. Дальнейшую очистку, как правило, проводят хроматографически. Металлический эрбий получают электролизом расплава хлорида (фторида) эрбия ErCl<sub>3</sub> (ErF<sub>3</sub>), а также кальцийтермическим восстановлением этих солей [2].

Используют эрбий в качестве компонента магнитных сплавов с Fe, Co, Ni, обладающих высокой индукцией и магнитострикцией. В соединении с ванадием и при добавлении в различные сплавы снижается их твердость и увеличивается работоспособность.

Эрбий-никелевый сплав (ErNi) имеет необычно высокую теплоемкость и используется в криокулерах; смесь 65% Er<sub>3</sub>Co и 35% Er<sub>0,9</sub>Yb<sub>0,1</sub>Ni по объему улучшает удельную теплоемкость [1].

При низких температурах эрбий представляет собой очень сильный магнит. При добавлении его в сплавы их жесткость значительно понижается, а жизненный цикл продлевается. Электродный потенциал эрбия относительно стандартного водородного при комнатной температуре равен –2,1 В.

Исследованы сплавы эрбия с основными компонентами промышленных сплавов – магнием, алюминием, железом, титаном. При 5% сплавляется с алюминием, магнием, железом и титаном с образованием во всех случаях двухфазных смесей эвтектического или перитектического типа. Для исследованных сплавов эрбий является хорошим модификатором и упрочнителем, но с танталом не сплавляется. Эрбий используется для получения магнитных сплавов с кобальтом и никелем.

На воздухе эрбий окисляется медленно, при нагревании во влажном воздухе несколько быстрее, с минеральными кислотами образует соли. Взаимодействует с O<sub>2</sub>, галогенами, халькогенами, N<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>

при нагревании, образуя соединения Er (III). В водных средах эрбий существует в виде гидратированных ионов  $Er^{3+}$ . С различными органическими и неорганическими лигандами ион Er (III) образует соединения с координационными числами от 9 до 15. По химическим свойствам подобен другим лантаноидам. Er (I) известен только в гидролитически неустойчивых галогенидных кластерах типа  $ErX$ ,  $Er_4X_5$ ,  $Er_7X_{10}$ ,  $Er_6X_7$  и т. п., где  $X = Cl, Br, I$ , образующихся при взаимодействии металлического эрбия с  $ErX_3$ .

Оксид  $Er_2O_3$  получают разложением  $Er(NO_3)_3$ ,  $Er_2(SO_4)_3$ ,  $Er_2(CrO_4)_3$  или других солей на воздухе обычно при 800–1000 °С. Оксид эрбия представляет собой порошок розового цвета. Используется для специальных керамик, люминофоров, лазерных стекол, а также в электронике при контроле нейтронами в атомной промышленности. Допустимая концентрация в воздухе 4 мг/м<sup>3</sup>.

Трифторид  $ErF_3$  получают взаимодействием  $Er_2O_3$  с HF-газом при 500 °С, термическим разложением фтораммониевых солей  $(NH_4)_3ErF_6$  при 400–500 °С. В атмосфере Ar,  $N_2$  применяют для получения чистого металлического эрбия металлотермическим способом в качестве компонента твердых электролитов.

Трихлорид  $ErCl_3$  гигроскопичен; получают взаимодействием смеси  $Cl_2$  и  $CCl_4$  с оксидом или оксалатом эрбия выше 200 °С, хлорированием эрбия и др. Применяют для получения металлоорганических соединений эрбия и металлического эрбия металлотермически или электрохимически [1].

Гидроксид эрбия  $Er(OH)_3$  розового цвета, не растворяется в воде, образуется по обменной реакции между NaOH и водными растворами солей эрбия (III).

Трибромид эрбия  $ErBr_3$  ( $t_{пл} = 950$  °С) и трийодид  $ErI_3$  ( $t_{пл} = 1015$  °С) – вещества фиолетового цвета, весьма гигроскопичные, хорошо растворяются в воде, кристаллизуются из растворов в виде окта- и нонагидратов соответственно.

Основными соединениями эрбия являются оксид  $Er_2O_3$ , трифторид  $ErF_3$ , трихлорид  $ErCl_3$ , гидроксид эрбия  $Er(OH)_3$ , трибромид  $ErBr_3$  и трийодид  $ErI_3$  эрбия.

Одно из важнейших направлений использования эрбия – его применение в виде оксида (иногда бора-та) в ядерной энергетике. Смесь оксида эрбия и оксида урана позволяет резко улучшить работу реактора большой мощности (РБМК), повысив в них энергораспределение, технико-экономические параметры, и что особенно важно – безопасность работы реакторов [1].

Эрбий используется в стержнях реактора, регулирующий процесс деления ядер атомов в ядерном реакторе. Выполнен из материала, который обладает увеличенной способностью поглощать нейтроны.

Регулирующие стержни изготавливают из кадмия, бора, редкоземельных элементов, в том числе и эрбия. Изменение положения регулирующего стержня способствует повышению реактивности, изменению количества ядерного топлива или атомных ядер, которые поглощают нейтроны [2].

В настоящее время активные зоны водоохлаждаемых ядерных реакторов формируются из тепловыделяющих сборок, содержащих топливо различного состава с добавкой выгорающего поглотителя, что позволяет компенсировать реактивность, выравнивать энерговыделение по объему активной зоны и поддерживать температурный коэффициент реактивности на заданном уровне. В качестве выгорающего поглотителя в топливе для реакторов РБМК используют эрбий, который вводят в виде порошка оксида эрбия непосредственно при изготовлении топливных таблеток.

Наличие эрбия в топливе РБМК и увеличение его содержания позволяют осуществить замену в активной зоне части дополнительных поглотителей на рабочие тепловыделяющие сборки, что повышает глубину выгорания топлива.

Проблемой уран-эрбиевого топлива является присутствие эрбия, механически смешанного с порошком диоксида урана, что отрицательно сказывается на свойствах самого топлива, из-за уменьшения плотности, увеличении открытой пористости, снижении величины среднего размера зерна топливной таблетки. Указанные причины ограничивают возможность повышения содержания эрбия в топливе [2].

В ядерной энергетике эрбий применяется в основном для улучшения работы РБМК, изготовления регулирующих стержней, контролирующих атомные реакторы, выгорающего поглотителя в топливе для реакторов РБМК [3].

### Литература

1. Редкоземельные элементы: Технология и применение /Под ред. Ф. Виллани; Пер. с англ. А. Н. Штейнберга М.: Металлургия, 1985. 376 с.
2. Патентный поиск, 2012–2016 [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://www.findpatent.ru>, свободный.
3. Гетьман А. А., Ершов Г. А., Васильева А. В. Оценка надежности деталей и оборудования ядерных энергетических установок кораблей. СПб. ВМПИ, 2016.