



Краткие сообщения

Краткое сообщение

УДК 544.3

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12453>

Оценка термодинамической стабильности гексаалюминатов $RE MgAl_{11}O_{19}$ ($RE = La, Pr, Nd, Sm$) со структурой магнетоплюмбита в области высоких температур

К. С. Гавричев[✉], В. Н. Гуськов, П. Г. Гагарин, А. В. Гуськов

ФГБУН Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова Российской академии наук,
Ленинский проспект, 31, Москва 119991, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность данного исследования определяется дефицитом достоверной информации по свойствам высокотемпературных материалов для энергетики и авиационно-космической техники. Целью настоящей статьи является термодинамическая оценка стабильности гексаалюминатов магния-РЗЭ $RE MgAl_{11}O_{19}$ ($RE = La, Pr, Nd, Sm$) со структурой магнетоплюмбита - перспективных компонентов термобарьерных покрытий. Оценка выполнена на основании вычисления величин энергии Гиббса реакций разложения гексаалюминатов магния-РЗЭ на простые оксиды, а также на алюмо-магниевую шпинель $MgAl_2O_4$ и фаз $REAlO_3$ в температурном диапазоне 298–1800 К. Для вычислений использованы данные по термодинамическим свойствам гексаалюминатов, рассчитанные нами из значений теплоемкости, измеренных методом дифференциальной сканирующей калориметрии в интервале 300–1800 К, и литературным величинам по термодинамическим свойствам для простых оксидов, а также $MgAl_2O_4$ и $REAlO_3$. Информация по термодинамическим свойствам гексаалюминатов магния-РЗЭ, перспективных термобарьерных материалов, практически отсутствует. Целью статьи является термодинамическая оценка вероятности реакций разложения гексаалюминатов в области высоких температур.

На основании опубликованных ранее данных по высокотемпературной теплоемкости соединений состава $RE MgAl_{11}O_{19}$ ($RE = La, Pr, Nd, Sm$) рассчитаны температурные зависимости энтропии, изменения энтальпии, которые использованы для оценки энергии Гиббса реакций разложения гексаалюминатов на составляющие оксиды.

Температурные зависимости энергии Гиббса четырех возможных реакций разложения гексаалюминатов позволили сделать выводы о термодинамической стабильности в области высоких температур.

Ключевые слова: гексаалюминаты, магнетоплюмбит, РЗЭ, термодинамика, термобарьерные покрытия

Источник финансирования: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда № 23-13-00051.

Для цитирования: Гавричев К. С., Гуськов В. Н., Гагарин П. Г., Гуськов А. В. Оценка термодинамической стабильности гексаалюминатов $RE MgAl_{11}O_{19}$ ($RE = La, Pr, Nd, Sm$) со структурой магнетоплюмбита в области высоких температур. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2024;26(4): 782–788. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12453>

For citation: Gavrichev K. S., Guskov V. N., Gagarin P. G., Guskov A. V. Evaluation of the thermodynamic stability of $RE MgAl_{11}O_{19}$ ($RE = La, Pr, Nd, Sm$) hexaaluminates with a magnetoplumbite structure in the high temperature region. *Condensed Matter and Interphases*. 2024;26(4): 782–788. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12453>

✉ Гавричев Константин Сергеевич, e-mail: gavrich@igic.ras.ru

© Гавричев К. С., Гуськов В. Н., Гагарин П. Г., Гуськов А. В., 2024



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

Повышение эффективности современных энергетических турбинных установок и авиационных двигателей в значительной мере зависит от создания новых материалов, позволяющих существенно увеличить температуру газов в рабочей зоне. Детали из никель-кобальтовых сплавов, используемых для изготовления ответственных деталей (например, турбинных лопаток), могут эффективно эксплуатироваться, даже при использовании охлаждения не выше 1000–1200 °C [1]. Применение оксидных покрытий металлических деталей при наличии охлаждения внутренних поверхностей дало возможность увеличить температуру рабочих газов на сотни градусов за счет создания большого градиента температуры в оксидном слое [2, 3]. Покрытия, защищающие от воздействия высокой температуры, называют термобарьерными. Еще одной важной функцией оксидных покрытий является защита от химического воздействия с веществами в газовом и конденсированном состоянии, которые образуются при сгорании топлива и в виде взвешенных частиц попадают в турбину с засасываемым воздухом [4].

До последнего времени основным материалом для создания термобарьерных покрытий являлся диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия, YSZ [5]. Недостатками этого вещества являются ограничение по температуре применения (около 1200 °C), связанное с наличием фазового перехода [6], и значительная диффузия кислорода при высоких температурах, приводящая к окислению поверхности металлических деталей. В связи с этим был предложен ряд высокотемпературных сложных оксидов РЗЭ – цирконатов $RE_2Zr_2O_7$ [7], гафнатов $RE_2Hf_2O_7$ и $RE_2O_3 \cdot 2HfO_2$ [8], танталатов $RETaO_4$ и RE_3TaO_7 [9, 10], ниобатов $RENbO_7$ [11] и др., которые удовлетворяли основным требованиям к термобарьерным покрытиям – имели высокие температуры плавления, отсутствие фазовых переходов в широком температурном диапазоне, низкую теплопроводность, определенный коэффициент термического расширения, механические свойства. В настоящее время проявлен также интерес к гексаалюминатам магния-РЗЭ [12], который обусловлен их меньшей, по сравнению с YSZ, теплопроводностью и потенциальной химической стойкостью к оксидам группы CMAS (CaO, MgO, Al_2O_3 и SiO_2) при высоких температурах [13].

Одним из путей оценки применимости того или иного оксида термобарьерных покрытий в условиях высоких температур и коррозионном действии газов и веществ в конденсированном состоянии (в частности - расплавов) является термодинамическая оценка возможных реакций разложения (распада) сложных оксидов на более простые, а также реакций взаимодействия с веществами окружающей среды в области высоких температур, для чего необходимо определение энергии Гиббса этих реакций.

Опубликованная тройная фазовая диаграмма RE_2O_3 - MgO - Al_2O_3 [14] характеризуется наличием 4 эвтектик и ряда фаз (La_2O_3 , MgO , Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $La_2O_3 \cdot Al_2O_3$, $2La_2O_3 \cdot 11Al_2O_3$) (рис. 1). Можно отметить, что фаза $LaMgAl_{11}O_{19}$ со структурой магнетоблюмбита на ней не показана. Можно предположить, что для других редкоземельных элементов, начиная с тербия, на квазибинарной диаграмме RE_2O_3 - Al_2O_3 кроме перовскитов $REAlO_3$ будут присутствовать и другие соединения: алюмогранаты $RE_3Al_5O_{12}$ и $RE_4Al_2O_9$ с моноклинной структурой.

Информация об экспериментальном определении термодинамических свойств гексаалюминатов со структурой магнетоблюмбита касаются только данных по теплоемкости и крайне ограничены. В работе [15] теплоемкость $LaMgAl_{11}O_{19}$ определена термоаналитически и представлена в виде мелкого графика. В [16] для определения теплопроводности $REMgAl_{11}O_{19}$ ($RE = La, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd$) использовали величины удель-

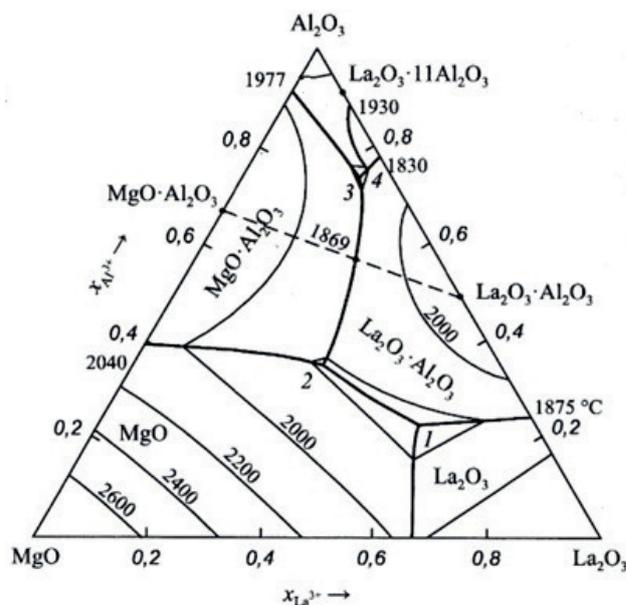


Рис. 1. Фазовая диаграмма La_2O_3 - MgO - Al_2O_3 по данным [14]

ной теплоемкости, рассчитанные по правилу Нейманна-Коппа и приведенные в графическом виде. Наиболее достоверные данные были получены измерением теплоемкости LaMgAl₁₁O₁₉ и SmMgAl₁₁O₁₉ методом дифференциальной сканирующей калориметрии в интервале высоких температур [17, 18, 19, 20] и представлены в виде уравнения Майера–Келли $C_p(T) = A + B \times T - C/T^2$.

По известным соотношениям из данных по теплоемкости могут быть рассчитаны значения энтропии и изменения энтальпии:

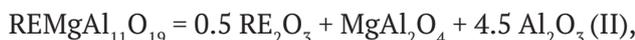
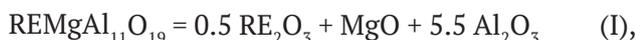
$$S^\circ(T - 298.15) = \int_{298.15}^T \frac{C_p}{T} dT \quad (1)$$

и

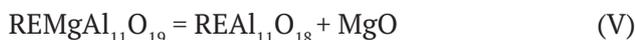
$$H^\circ(T) - H^\circ(298.15) = \int_{298.15}^T C_p dT. \quad (2)$$

2. Оценка энергии Гиббса

Для проведения оценки термодинамической стабильности гексаалюминатов REMgAl₁₁O₁₉ (RE=La, Pr, Nd, Sm) в области высоких температур необходимо выполнить расчет энергии Гиббса возможных реакций образования из оксидов, для которых есть данные по энтальпиям образования при 298.15 К, изменениям энтальпии и энтропии в области высоких температур:



Реакции распада на простые оксиды, алюмо-магниевою шпинель и алюминаты REAlO₃ со структурой перовскита выбраны потому, что они присутствуют на тройной фазовой диаграмме, приведенной в [14]. Оценка по реакции



невозможна из-за отсутствия данных для REAl₁₁O₁₈.

Для четырех приведенных выше реакций температурная зависимость энергии Гиббса, которая рассчитывается как разность величин для продуктов реакции и исходных веществ, может быть записана в виде:

Реакция (I):

$$\Delta_{r(I)} G^\circ(T) = [0.5\Delta_f G^\circ(\text{RE}_2\text{O}_3, T) + \Delta_f G^\circ(\text{MgO}, T) + 5.5\Delta_f G^\circ(\text{Al}_2\text{O}_3, T)] - \Delta_f G^\circ(\text{REMgAl}_{11}\text{O}_{19}, T). \quad (3)$$

Реакция (II):

$$\Delta_{r(II)} G^\circ(T) = [0.5\Delta_f G^\circ(\text{RE}_2\text{O}_3, T) + \Delta_f G^\circ(\text{MgAl}_2\text{O}_4, T) + 4.5\Delta_f G^\circ(\text{Al}_2\text{O}_3, T)] - \Delta_f G^\circ(\text{REMgAl}_{11}\text{O}_{19}, T). \quad (4)$$

Реакция (III):

$$\Delta_{r(III)} G^\circ(T) = [\Delta_f G^\circ(\text{REAlO}_3, T) + \Delta_f G^\circ(\text{MgO}, T) + 5 \times \Delta_f G^\circ(\text{Al}_2\text{O}_3, T)] - \Delta_f G^\circ(\text{REMgAl}_{11}\text{O}_{19}, T). \quad (5)$$

Реакция (IV):

$$\Delta_{r(IV)} G^\circ(T) = [\Delta_f G^\circ(\text{REAlO}_3, T) + \Delta_f G^\circ(\text{MgAl}_2\text{O}_4, T) + 4\Delta_f G^\circ(\text{Al}_2\text{O}_3, T)] - \Delta_f G^\circ(\text{REMgAl}_{11}\text{O}_{19}, T). \quad (6)$$

Энергия Гиббса реакций (I-IV) может быть записана в виде суммы двух составляющих – энтальпийной и энтропийной.

Реакция (I):

$$\Delta_{r(I)} G^\circ(T) = \{[0.5\Delta_f H^\circ(\text{RE}_2\text{O}_3, T) + \Delta_f H^\circ(\text{MgO}, T) + 5.5\Delta_f H^\circ(\text{Al}_2\text{O}_3, T)] - \Delta_f H^\circ(\text{REMgAl}_{11}\text{O}_{19}, T)\} - T\{[0.5S^\circ(\text{RE}_2\text{O}_3, T) + S^\circ(\text{MgO}, T) + 5.5S^\circ(\text{Al}_2\text{O}_3, T)] - S^\circ(\text{REMgAl}_{11}\text{O}_{19}, T)\}. \quad (7)$$

Реакция (II):

$$\Delta_{r(II)} G^\circ(T) = \{[0.5\Delta_f H^\circ(\text{RE}_2\text{O}_3, T) + \Delta_f H^\circ(\text{MgAl}_2\text{O}_4, T) + 4.5\Delta_f H^\circ(\text{Al}_2\text{O}_3, T)] - \Delta_f H^\circ(\text{REMgAl}_{11}\text{O}_{19}, T)\} - T\{[0.5S^\circ(\text{RE}_2\text{O}_3, T) + S^\circ(\text{MgAl}_2\text{O}_4, T) + 4.5S^\circ(\text{Al}_2\text{O}_3, T)] - S^\circ(\text{REMgAl}_{11}\text{O}_{19}, T)\}. \quad (8)$$

Реакция (III):

$$\Delta_{r(III)} G^\circ(T) = \{[\Delta_f H^\circ(\text{REAlO}_3, T) + \Delta_f H^\circ(\text{MgO}, T) + 5\Delta_f H^\circ(\text{Al}_2\text{O}_3, T)] - \Delta_f H^\circ(\text{REMgAl}_{11}\text{O}_{19}, T)\} - T\{[S^\circ(\text{REAlO}_3, T) + S^\circ(\text{MgO}, T) + 5S^\circ(\text{Al}_2\text{O}_3, T)] - S^\circ(\text{REMgAl}_{11}\text{O}_{19}, T)\}. \quad (9)$$

Реакция (IV):

$$\Delta_{r(IV)} G^\circ(T) = \{[\Delta_f H^\circ(\text{REAlO}_3, T) + \Delta_f H^\circ(\text{MgAl}_2\text{O}_4, T) + 4\Delta_f H^\circ(\text{Al}_2\text{O}_3, T)] - \Delta_f H^\circ(\text{REMgAl}_{11}\text{O}_{19}, T)\} - T\{[S^\circ(\text{REAlO}_3, T) + S^\circ(\text{MgAl}_2\text{O}_4, T) + 4S^\circ(\text{Al}_2\text{O}_3, T)] - S^\circ(\text{REMgAl}_{11}\text{O}_{19}, T)\}. \quad (10)$$

Для вычисления энтальпийной составляющей в широком температурном диапазоне необходимы данные по энтальпиям соответствующих реакций при 298.15 К и температурные зависимости изменения энтальпии и энтропии для каждого участника реакции.

Необходимые для расчета термодинамические величины были заимствованы из оригинальных статей [17–24] и справочников [25–27]. В литературе имеются величины энтальпии образования для перовскитов LaAlO₃ и PrAlO₃ [28], а данных по температурной зависимости теплоемкости в литературе не найдено, в связи с чем вычисления выполнены только для соединений неодима и самария. Оценочные значения энтальпии образования гексаалюминатов REMgAl₁₁O₁₉ (RE=La, Pr, Nd, Sm) со структурой

магнетоплюмбита получены нами методом калориметрии сброса [29]. Результаты расчетов по энтальпиям и энергиям Гиббса реакций (I–IV) в области температур 298.15–1800 К представлены на рис. 2–5.

Из рис. 2 следует, что величины энергии Гиббса реакции (I) для соединений лантана, празеодима и неодима имеют положительные значения в изученном температурном интервале, в то время как для соединения самария наблюдается изменение знака на отрицательный, что

может свидетельствовать о его термодинамической нестабильности в области ниже 1400 К. Хотя следует заметить, что с учетом ошибки (порядка ± 10 кДж/моль) определения это значение может сдвинуться в область более низких температур (до 800 К). Также можно отметить общую тенденцию понижения термодинамической стабильности от лантана к самарию.

Значения энергии Гиббса реакции (II) для $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ становятся отрицательными выше 1100 К, что свидетельствует о возможности про-

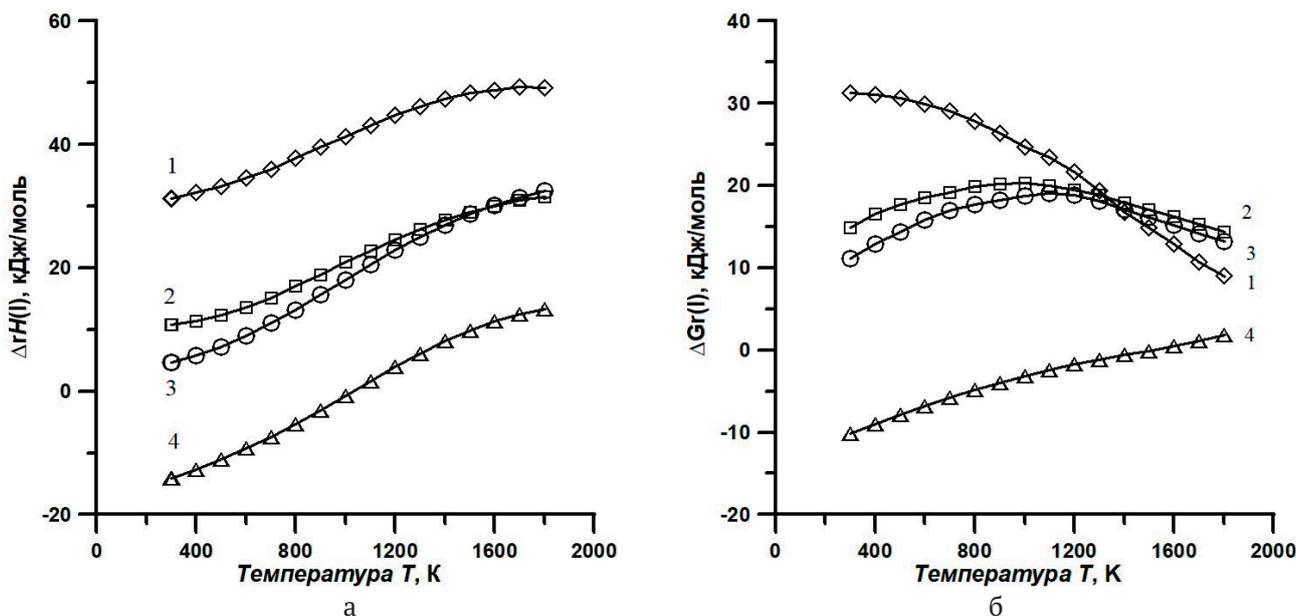


Рис. 2. Температурная зависимость энтальпии (а) и энергии Гиббса (б) реакции (I) для: 1 – $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$, 2 – $\text{PrMgAl}_{11}\text{O}_{19}$, 3 – $\text{NdMgAl}_{11}\text{O}_{19}$, 4 – $\text{SmMgAl}_{11}\text{O}_{19}$

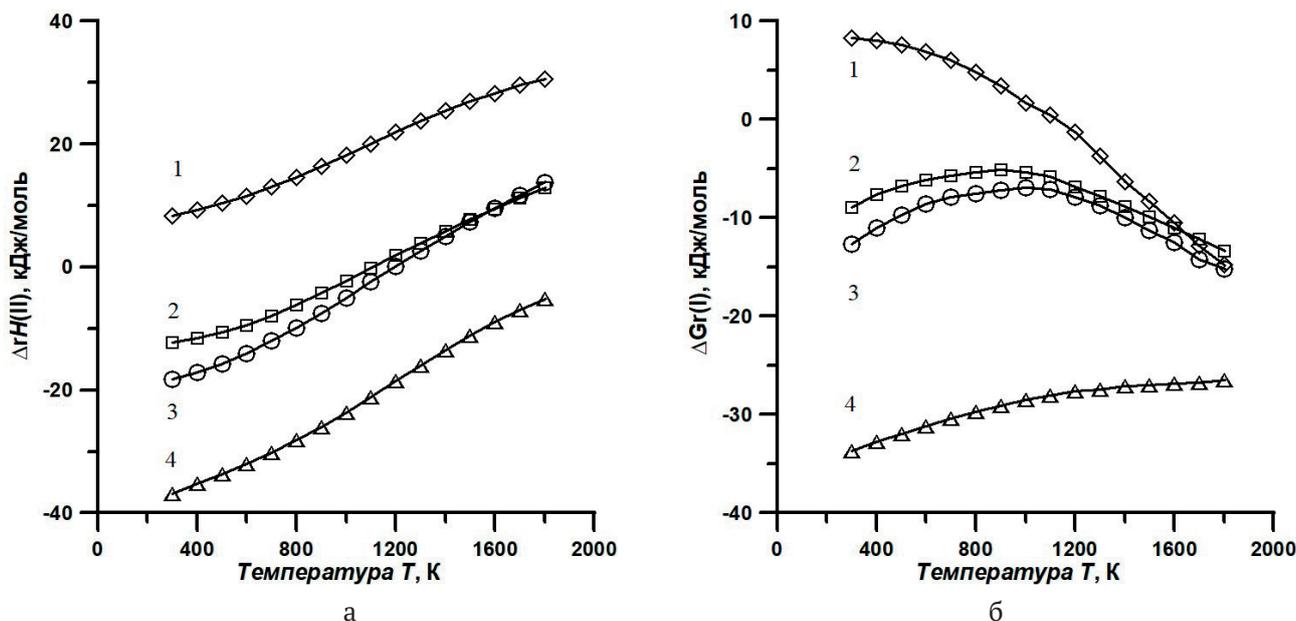


Рис. 3. Температурная зависимость энтальпии (а) и энергии Гиббса (б) реакции (II) для: 1 – $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$, 2 – $\text{PrMgAl}_{11}\text{O}_{19}$, 3 – $\text{NdMgAl}_{11}\text{O}_{19}$, 4 – $\text{SmMgAl}_{11}\text{O}_{19}$

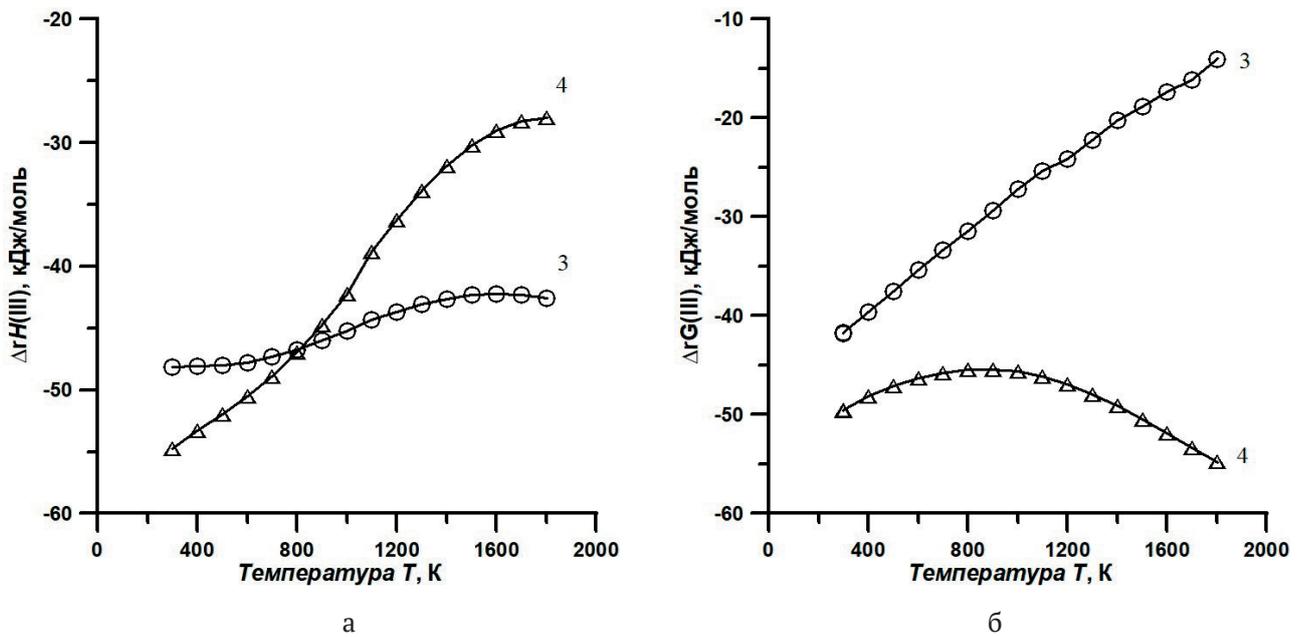


Рис. 4. Температурная зависимость энтальпии (а) и энергии Гиббса (б) реакции (III) для: 3 – $NdMgAl_{11}O_{19}$, 4 – $SmMgAl_{11}O_{19}$

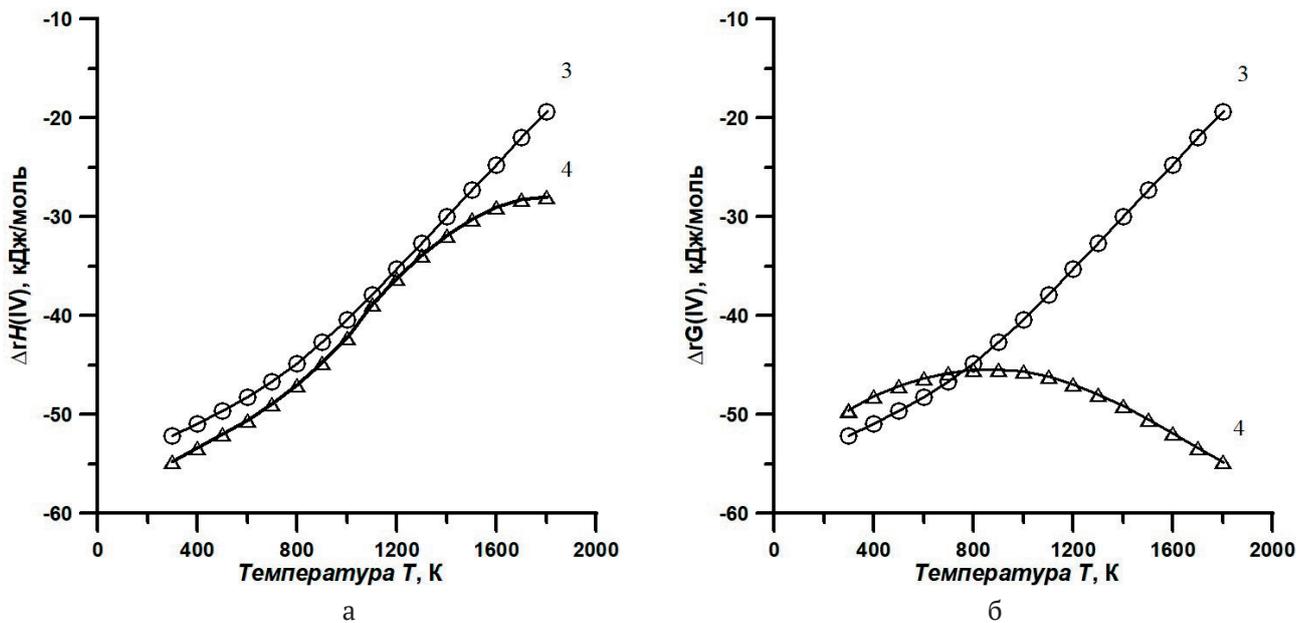


Рис. 5. Температурная зависимость энтальпии (а) и энергии Гиббса (б) реакции (IV) для: 3 – $NdMgAl_{11}O_{19}$, 4 – $SmMgAl_{11}O_{19}$.

текания этой реакции. Судя по температурным зависимостям энергии Гиббса для $PrMgAl_{11}O_{19}$, $NdMgAl_{11}O_{19}$ и $SmMgAl_{11}O_{19}$, приведенным на рис. 3 и имеющим отрицательные значения, реакция (II) для этих соединений возможна во всем диапазоне высоких температур.

Судя по знаку энергии Гиббса для реакции с распадом на оксиды магния и алюминия, а также перовскиты $REAlO_3$ (RE = Nd, Sm), протекание этого процесса весьма вероятно.

Существенные отрицательные величины энергии Гиббса свидетельствуют о том, что реакция (IV) получения гексаалюминатов магния-неодима и магния-самария из перовскитов, шпинели и оксида алюминия протекать не должна. Значительное различие вида зависимостей энтальпии и энергии Гиббса реакции (III) и (IV) объясняется влиянием энтропийного фактора.

3. Заключение

Анализ термодинамической стабильности гексаалюминатов магния-РЗЭ $RE\text{MgAl}_{11}\text{O}_{19}$, выполненный на основе расчета энергии Гиббса реакций распада на простые оксиды, алюмо-магниевою шпинель и перовскиты $RE\text{AlO}_3$ позволил определить вероятность их протекания в широком температурном диапазоне. Показано влияние энтальпийного и энтропийного факторов на вид температурной зависимости энергии Гиббса реакций разложения гексаалюминатов на более простые оксиды.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

- Huang E-W., Tung C., Liaw P. K. High-temperature materials for structural applications: New perspectives on high-entropy alloys, bulk metallic glasses, and nanomaterials. *MRS Bulletin*. 2019;44: 847–853. <https://doi.org/10.1557/mrs.2019.257>
- Lakiza S. M., Grechanyuk M. I., Ruban O. K., ... Prokhorenko S. V. Thermal barrier coatings: current status, search, and analysis. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2018;57(1-2): 82–113. <https://doi.org/10.1007/s11106-018-9958-0>
- Stiger M. J., Yanar M. M., Topping M. G., Pettit F. S., Meier G. H. Thermal barrier coatings for the 21st century. *International Journal of Materials Research*. 1999;90(12): 1069–1078. <https://doi.org/10.1515/ijmr-1999-901218>
- Tejero-Martin D., Bennett C., T. Hussain T. A review on environmental barrier coatings: History, current state of the art and future developments. *Journal of European Ceramic Society*. 2021;41(3): 1747–1768. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.10.057>
- Poliarus O., Morgiel J., Żórawski W., ... Cherniushok O. Microstructure, mechanical and thermal properties of YSZ thermal barrier coatings deposited by axial suspension plasma spraying. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2023;23: 89(1-11). <https://doi.org/10.1007/s43452-023-00616-8>
- Горелов В. П., Беляков С. А., Абдурахимова Р. К. Фазовые переходы в моноклинном ZrO_2 . *Физика твердого тела*. 2023;65(3): 472. <https://doi.org/10.21883/pss.2023.03.55589.541>
- Frommherz M., Scholz A., Oechsner M., Bakan E., Vaßen R. Gadolinium zirconate/YSZ thermal barrier coatings: Mixed-mode interfacial fracture toughness and sintering behavior. *Surface and Coating Technologies*. 2016;286: 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.12.012>
- Каблов Е. Н., Доронин О. Н., Артеменко Н. И., Стехов П. А., Мараховский П. С., Столярова В. Л. Исследование физико-химических свойств керамики на основе системы $\text{Sm}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-HfO}_2$ для разработки перспективных теплозащитных покрытий. *Журнал неорганической химии*. 2020;65(6): 846–855. <https://doi.org/10.31857/s0044457x20060070>
- Chen L., Hu M., Guo J., Chong X., Feng J. Mechanical and thermal properties of $RE\text{TaO}_4$ (RE = Yb, Lu, Sc) ceramics with monoclinic-prime phase. *Journal of Materials Science and Technology*. 2020;52: 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.02.051>
- Chen L., Song P., Feng J. Influence of ZrO_2 alloying effect on the thermophysical properties of fluorite-type Eu_3TaO_7 ceramics. *Scripta Materialia*. 2018;152: 117–121. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.03.042>
- Chen L., Guo J., Zhu Y., Hu M., Feng J. Features of crystal structures and thermo-mechanical properties of weberites $RE_3\text{NbO}_7$ (RE = La, Nd, Sm, Eu, Gd) ceramics. *Journal of American Ceramic Society*. 2021;104: 404–412. <https://doi.org/10.1111/jace.17437>
- Gadow R., Lischka M. Lanthanum hexaaluminate – novel thermal barrier coatings for gas turbine applications – materials and process development. *Surface and Coating Technologies*. 2002;151 –152: 392–399. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01642-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01642-5)
- Pitek F. M., Levi C. G. Opportunities for TBCs in the $ZrO_2\text{-YO}_{1.5}\text{-TaO}_{2.5}$ system. *Surface and Coating Technologies*. 2007;201: 6044–6050. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.11.011>
- Михайлов Г. Г., Макровец Л. А., Смирнов Л. А. Термодинамика процессов взаимодействия компонентов жидкого металла в системе Fe–Mg–Al–La–O. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2018;61(6): 460–465. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-6-460-465>
- Friedrich C., Gadow R., Schirmer T. Lanthanum hexaaluminate – a new material for atmospheric plasma spraying of advanced thermal barrier coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2001;10(4): 592–598. <https://doi.org/10.1361/105996301770349105>
- Lu H., Wang C.-An, Zhang C., Tong S. Thermo-physical properties of rare-earth hexaaluminates $\text{LnMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ (Ln: La, Pr, Nd, Sm, Eu and Gd) magnetoplumbite for advanced thermal barrier coatings. *Journal of the European Ceramic Society*. 2015;35: 1297–1306. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.10.030>
- Гагарин П. Г., Гуськов А. В., Гуськов В. Н., Хорошилов А. В., Рюмин М. А., Гавричев К. С. Синтез и высокотемпературная теплоемкость гексаалюминатов состава $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ и $\text{SmMgAl}_{11}\text{O}_{19}$. *Журнал неорганической химии*. 2023;68(11): 1607–1613 <https://doi.org/10.31857/S0044457X23601062>
- Гагарин П. Г., Гуськов А. В., Гуськов В. Н., Никифорова Г. Е., Гавричев К. С. Теплоемкость и термическое расширение $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$. *Журнал неорганической химии*. 2024;69(6): принята к публикации.
- Гагарин П. Г., Гуськов А. В., Гуськов В. Н., Хорошилов А. В., Ефимов Н. Н., Гавричев К. С. Теплоемкость и

магнитные свойства $\text{PrMgAl}_{11}\text{O}_{19}$. *Журнал физической химии*. 2024; принята к публикации.

20. Гагарин П. Г., Гуськов А. В., Гуськов В. Н., Рюмин М. А., Никифорова Г. Е., Гавричев К. С. Теплоемкость гексаалюмината магния-неодима $\text{NdMgAl}_{11}\text{O}_{19}$. *Журнал физической химии*. 2024; принята к публикации.

21. van der Laan R. R., Konings R. J. M., van Gendren A. C. G., van Miltenburg J. C. The heat capacity of NdAlO_3 from 0 to 900 K. *Thermochimica Acta*. 1999;329: 1–6 [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(99\)00006-4](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(99)00006-4)

22. Kopan A. R., Gorbachuk M. P., Lakiza S. M., Tishchenko Ya. S. Thermodynamic characteristics of SmAlO_3 in the range 55–300 K. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2012;51(3-4): 209–216. <https://doi.org/10.1007/s11106-012-9419-0>

23. Konings R. J. M., Beneš O., Kovács A., ... Osina E. The thermodynamic properties of the *f*-elements and their compounds. Part 2. The lanthanide and actinide oxides. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 2014;4: 013101-1–013101-95. <https://doi.org/10.1063/1.4825256>

24. Zinkevich M. Thermodynamics of rare earth sesquioxides. *Progress in Materials Science*. 2007;52: 597–647. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.09.002>

25. Chase M. W. Jr. *NIST-JANAF thermochemical tables. Journal of Physical and Chemical Reference Data Monographs*. Washington DC: American Inst. of Physics; 1998, 1951 p.

26. Barin I. *Thermochemical Data of Pure Substances*. 3rd Edition. Published jointly by G. Platzki. VCH - Weinheim; New York; Base1; Cambridge; Tokyo: VCH. 2003 p.

27. Глушко В. П. *Термические константы веществ*. Справочник. М.: 1965–1982. Режим доступа: https://www.chem.msu.ru/cgibin/tkv.pl?show=welcome.html&_ga

28. Zhang Y., Navrotsky A. Thermochemistry of rare-earth aluminate and aluminosilicate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2004;341: 141–151. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2004.04.027>

29. Gavrichiev K. S., Guskov V. N., Gagarin P. G., Guskov A. V., Khoroshilov A. V. Heat capacity and thermodynamic

properties of $\text{RE}\text{MgAl}_{11}\text{O}_{19}$ (RE = La, Pr, Nd, Sm) hexaaluminates with magnetoplumbite structure. In: *XXIV International Conference on Chemical Thermodynamics in Russia RCCT-2024, July 1–5, 2024, Ivanovo, Russia RCCT-2024. Book of abstracts*. Ivanovo: JSC “Ivanovo Publishing House” Publ.; 2024. p. 318. Available at: <https://rcct.isc-ras.ru/sites/default/files/collectionabstracts/56/rcct-2024.pdf>

Информация об авторах

Гавричев Константин Сергеевич, д. х. н., гл. н. с., заведующий лабораторией термического анализа и калориметрии, Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова Российской академии наук (Москва, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-5304-3555>
gavrich@igic.ras.ru

Гуськов Владимир Николаевич, д. х. н., вед. н. с. лаборатории термического анализа и калориметрии, Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова Российской академии наук (Москва, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-0425-8618>
guskov@igic.ras.ru

Гагарин Павел Георгиевич, к. х. н., с. н. с. лаборатории термического анализа и калориметрии, Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова Российской академии наук (Москва, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-6450-3959>
gagarin@igic.ras.ru

Гуськов Антон Владимирович, к. х. н., н. с. лаборатории термического анализа и калориметрии, Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова Российской академии наук (Москва, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-0826-5495>
a.gus@igic.ras.ru

Поступила в редакцию 18.07.2024; одобрена после рецензирования 30.07.2024; принята к публикации 16.09.2024; опубликована онлайн 25.12.2024.