

УДК 544.31+53.096

ТЕПЛОЕМКОСТЬ И ТЕРМИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$

© 2024 г. П. Г. Гагарин^{a, *}, А. В. Гуськов^a, В. Н. Гуськов^a, Г. Е. Никифорова^a, К. С. Гавричев^a

^aИнститут общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН,
Ленинский пр-т, 31, Москва, 119991 Россия

*e-mail: gagarin@igic.ras.ru

Поступила в редакцию 25.01.2024 г.

После доработки 13.02.2024 г.

Принята к публикации 15.02.2024 г.

Методами релаксационной, адиабатической и дифференциальной сканирующей калориметрии измерена теплоемкость $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ со структурой магнетоплюмбита в интервале температур 7–1865 К. Полученные температурные зависимости теплоемкости согласованы на основании данных адиабатической калориметрии. По сглаженным значениям рассчитаны термодинамические функции (энтропия, изменение энтальпии, приведенная энергия Гиббса) в области 0–1865 К. Методом высокотемпературной рентгеновской дифракции изучено термическое расширение в области 300–1200 К и вычислен коэффициент термического расширения $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$.

Ключевые слова: гексаалюминат, магнетоплюмбит, теплоемкость, термодинамика, термическое расширение

DOI: 10.31857/S0044457X24060089, EDN: XTGLKG

ВВЕДЕНИЕ

Гексаалюминаты РЗЭ-магния со структурой магнетоплюмбита, $\text{REMGAl}_{11}\text{O}_{19}$, перспективны для использования в качестве компонентов термобарьерных покрытий, защищающих ответственные детали турбинных установок от воздействия высоких температур и взаимодействия с веществами в газовой и конденсированном состояниях. Одним из основных факторов, определяющих перспективность термобарьерных материалов, является низкая теплопроводность, благодаря которой можно повысить температуру газов в камере сгорания, увеличив таким образом эффективность установки. Гексаалюминаты со структурой магнетоплюмбита имеют теплопроводность почти на 20% меньшую, чем применяемый стабилизированный оксидом иттрия диоксид циркония YSZ [1].

В литературе указано, что это связано с особенностями структуры гексаалюминатов магния-РЗЭ со структурой магнетоплюмбита, в которой чередуются слои шпинели MgAl_2O_4 и оксидные слои [2]. Соединения состава $\text{REMGAl}_{11}\text{O}_{19}$ обладают комплексом теплофизических и механических свойств, необходимых для создания термобарьерных покрытий [3–7]. Эффекты, характерные для спекания керамики, у покрытий из $\text{REMGAl}_{11}\text{O}_{19}$ не обнаружены вплоть до температуры 1873 К [4]. Механиче-

ские свойства гексаалюминатов Mg-РЗЭ также показывают их перспективность при создании защитных покрытий [2, 4, 8]. Известно, что на поверхности сплава, наносимого на поверхность турбинных лопаток (MCrAlY ($\text{M} = \text{Ni}, \text{Co}, \text{NiCo}$)), образуется тонкий слой оксида алюминия [3, 9], поэтому при использовании в качестве защитного слоя гексаалюмината магния-лантана, термическое расширение которого [1, 4, 10, 11] сопоставимо с Al_2O_3 [12], не возникает существенных механических напряжений. В работе [13] проведено сравнительное изучение термического расширения свеженанесенных методом плазменного напыления $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ и YSZ, в котором установлено, что на кривой относительного удлинения $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ имеются две ступени после участка линейного расширения (0.93% в интервале температур 1132–1246 К и 0.22% в диапазоне 1392–1438 К). Первый эффект авторы связали с кристаллизацией образовавшейся при напылении аморфной фазы, а второй – с фазовым переходом $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, о чем сообщалось в [3, 12].

В литературе описаны различные варианты синтеза гексаалюминатов магния-РЗЭ со структурой магнетоплюмбита [14–16], однако в основном были использованы метод спекания оксидов с промежуточной гомогенизацией и финальным отжигом при высоких температурах [17] и осаждение из водных растворов с последующим отжигом осадка [11].

Информации по экспериментальному изучению теплоемкости гексаалюмината магния-лантана со структурой магнетоплюмбита в области низких температур в литературе не найдено. Результаты изучения высокотемпературной теплоемкости методом дифференциальной сканирующей калориметрии [18] свидетельствуют об отсутствии превращений в области 317–1817 К. Кроме того, имеются оценочные значения теплоемкости в области температур 298–1817 К, полученные в результате моделирования [3, 18, 19].

Результаты исследования термического расширения $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$, представленные в работах [1, 4, 10, 11, 17, 20], показывают, что величина КТР лежит в интервале 7.73×10^{-6} – $10.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ при 298–1773 К.

Цель настоящей работы – измерение теплоемкости $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ в широком температурном диапазоне и расчет термодинамических функций в интервале 0–1865 К, а также изучение термического расширения методами высокотемпературной рентгеновской дифракции.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образец $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ синтезировали методом обратного осаждения [21, 22], для этого готовили водные растворы $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (х. ч., 99.9 мас. %), $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (ч., РусХим) и $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (99.0 мас. %, РЕАХИМ). Исходные растворы со стехиометрическим соотношением металлов медленно приливали в водный раствор аммиака при интенсивном перемешивании. Полученный осадок гидроксидов сушили и ступенчато нагревали. На последней стадии образец отжигали при 1973 К в течение 6 ч. Ранее этот метод получения $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ успешно использовали в работе [18] при изучении высокотемпературной теплоемкости.

Идентификацию образца проводили методами рентгенофазового анализа, растровой электронной микроскопии и элементным анализом. Структура синтезированного образца и отсутствие в нем примесных фаз определены с помощью рентгеновского дифрактометра Bruker D8 Advance (CuK_α , $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$, Ni-фильтр, детектор Lynxeye, геометрия на отражение) в интервале углов $2\theta = 10^\circ$ – 80° . Результаты исследования обрабатывали программой BrukerEVA с использованием базы данных ICDD PDF-2. Кристаллографические параметры были рассчитаны методом полнопрофильного анализа с помощью программного обеспечения TOPAS 4.2.

Морфологию образцов и их чистоту исследовали с помощью электронного микроскопа Tescan Amber

с неиммерсионной колонной BrightBeam и ультра-высоким разрешением 1.3 нм при ускоряющем напряжении 2 кВ. В качестве детектора использовали BSE-детектор. Для определения состава поверхности применяли EDX-спектрометр при ускоряющем напряжении до 20 кВ.

Измерение теплоемкости проводили методами релаксационной (PPMS-9, Quantum Design Inc.), адиабатической (БКТ-3 с блоком Аксамит-9, ИП Малышев) и дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC 404F1 Pegasus, Netzsch). Перед этим точность определения теплоемкости проверяли измерением теплоемкости стандартных веществ (медь, бензойная кислота и корунд). Сглаживание экспериментальных значений и расчет термодинамических функций проводили с использованием опубликованного программного комплекса CpFit [23, 24].

Изучение термического расширения $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ выполнено методом высокотемпературной рентгеновской дифракции на порошковом рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Discover A25 (излучение CuK_α , Ni-фильтр, детектор LynxEye), оборудованном высокотемпературной камерой НТК 1200N, в интервале углов 10° – 65° [20] с шагом 0.02° [20] и временем в шаге 0.35–0.4 с. Высокотемпературную съемку проводили в интервале 298–1173 К с шагом по температуре 150 К, скоростью нагрева 10 К/мин и выдержкой образца перед съемкой 15 мин на каждом шаге. Кристаллографические параметры изучаемых соединений были рассчитаны методом полнопрофильного анализа с помощью программного обеспечения TOPAS 4.2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По данным РФА, дифрактограмма синтезированного образца $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$, полученная при комнатной температуре, соответствовала структуре магнетоплюмбита с пр. гр. $P6_3/mmc$ (рис. 1). Рассчитанные параметры элементарной ячейки удовлетворительно согласуются с литературными данными (табл. 1).

Анализ изображения поверхности образца, полученного методом растровой электронной микроскопии с использованием микроскопа TESCAN Amber (рис. 2), показал, что частицы гексаалюмината Mg-La имеют размер $>200 \text{ нм}$, вследствие чего полученные в настоящей работе термодинамические величины не требуют коррекции за счет размерного фактора.

Таблица 1. Параметры элементарной ячейки образца $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ со структурой магнетоплюмбита

Параметры элементарной ячейки			Литература
$a, \text{\AA}$	$c, \text{\AA}$	$V, \text{\AA}^3$	
5.5909(2)	21.974(1)	594.86(4)	наст. работа
5.5893–5.6181	21.9038–21.9988	593.57–601.33	[14]*
5.595	22.01	596.69	[15]
5.589	22.02	595.68	[16]

*В [14] приведены параметры для образцов, полученных разными методами.

Таблица 2. Массы образцов и температурные интервалы измерения теплоемкости различными калориметрическими методами

Тип калориметрии	Масса образца, г	Число экспериментальных точек	Интервал измерений, К
РК	0.01472	75	7.28–40.68
АК	0.60277	180	23.40–347.94
ДСК	0.03661	156	315–1865

По данным EDX-спектроскопии (рис. S1, S2) (25 определений) вычислено среднее отношение металлов в образце, которое составляет (ат. %) $\text{La} : \text{Mg} : \text{Al} = (3.76 \pm 0.95) : (3.04 \pm 0.22) : (34.34 \pm 1.51)$, что совпадает в пределах ошибки определения со стехиометрическим отношением (ат. %) $3.125 : 3.125 : 34.375$ (1 : 1 : 11). Картирование поверхности образца по элементам подтвердило его гомогенность (рис. S3a–S3e).

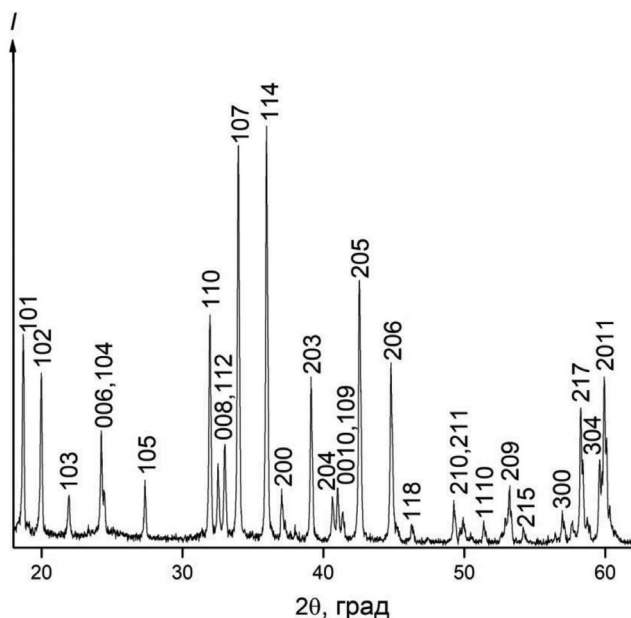
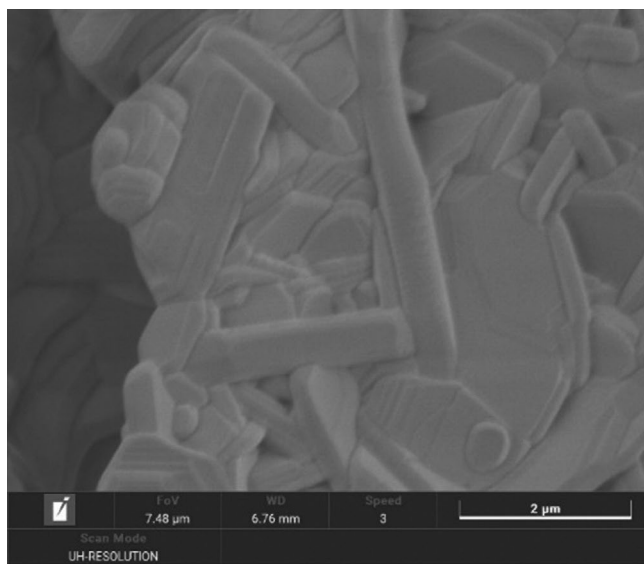
Молекулярная масса $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$, необходимая для расчета термодинамических функций (М.м. =

763.9951 г/моль), рассчитана исходя из стандартных атомных масс элементов, приведенных в [25].

Термодинамические свойства

Теплоемкость $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ измерена методами релаксационной (РК), адиабатической (АК) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Массы измеренных разными методами образцов, количество экспериментальных точек и температурные диапазоны измерений приведены в табл. 2.

Экспериментальные величины изобарной теплоемкости $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ приведены в табл. S1–S3. Полученные температурные зависимости теплоем-

**Рис. 1.** Дифрактограмма образца $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$.**Рис. 2.** Морфология поверхности $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ после отжига при 973 К.

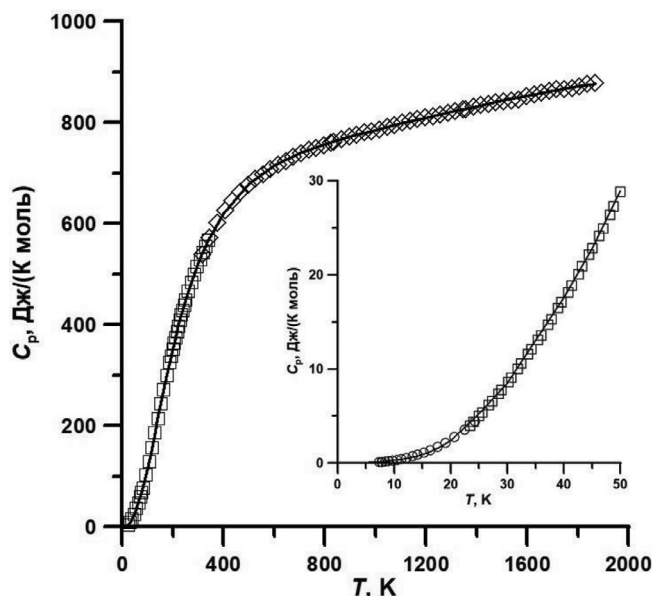


Рис. 3. Согласованные зависимости теплоемкости $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$, определенные методами релаксационной ($\circ$), адиабатической ($\square$) и дифференциальной сканирующей калориметрии ($\diamond$).

кости согласованы, принимая данные, полученные адиабатической калориметрией, за опорные, поскольку релаксационная и дифференциальная сканирующая калориметрии являются относительными методами и могут характеризоваться систематической ошибкой. Аномалий теплоемкости, которые могли бы свидетельствовать о протекании структурных превращений, не обнаружено во всем изученном интервале температур (рис. 3).

Данные по теплоемкости <13.5 К аппроксимированы с помощью уравнения:

$$C_p(T) = aT^3 + bT. \quad (1)$$

Температурная зависимость теплоемкости <13.5 К описана с помощью линейной комбинации функций Эйнштейна с использованием программы CpFit [23, 24]:

$$C_p(T) = 3R \sum a_i [(\theta_i/T)^2 e^{\theta_i/T} / (e^{\theta_i/T} - 1)^2], \quad (2)$$

где R – универсальная газовая постоянная, a_i и θ_i – варьируемые параметры.

Значения коэффициентов уравнений (1) и (2) приведены в табл. S4. Относительные отклонения экспериментальных значений теплоемкости от сглаживающей кривой ($\delta C_{p,m}$, %) приведены на рис. S4.

Согласованные значения теплоемкости сглажены, и на их основе рассчитаны термодинамические функции (энтропия $\Delta S^\circ(T)$, изменение энталь-

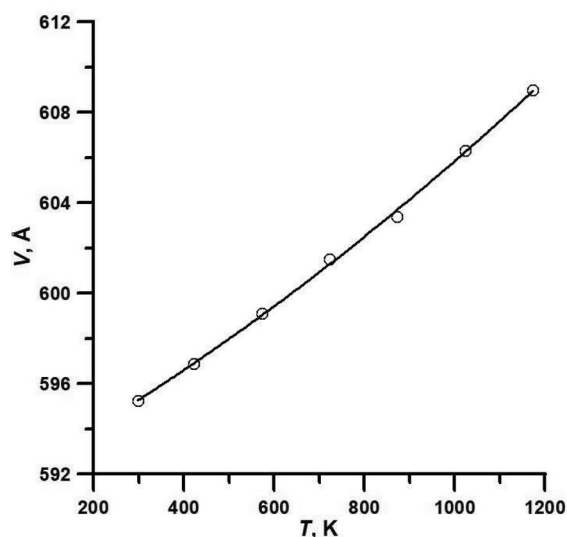
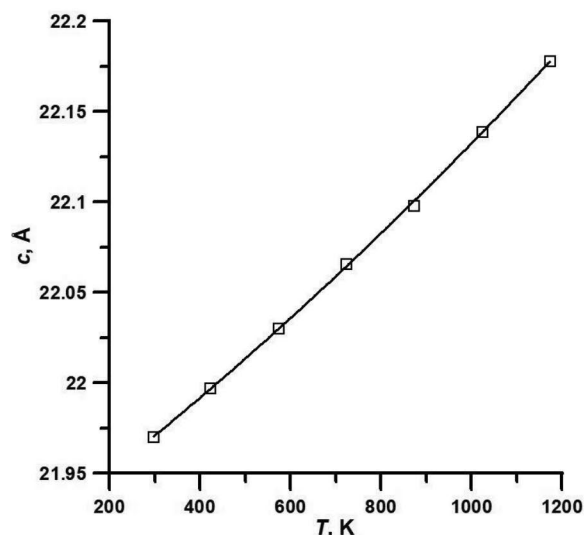
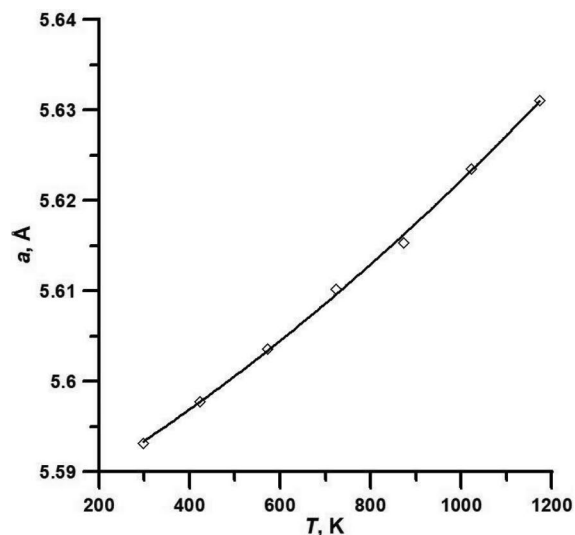


Рис. 4. Изменение параметров элементарной ячейки (a , c , V) $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ в интервале 298–1173 К.

Таблица 3. Термодинамические функции $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ (М.м. = 763.998 г/моль)

T , К	$C_p^\circ(T)$, Дж/(К моль)	$H^\circ(T) - H^\circ(0)$, Дж/моль	$S^\circ(T)$, Дж/(К моль)	$\Phi^{\text{oa}}(T)$, Дж/(К моль)
1	0.01075	0.005323	0.01061	0.005287
2	0.02284	0.02196	0.02166	0.01068
3	0.03756	0.05188	0.03359	0.01630
4	0.05626	0.09841	0.04685	0.02225
5	0.08025	0.1662	0.06187	0.02864
6	0.1108	0.2611	0.07910	0.03558
7	0.1494	0.3905	0.09897	0.04318
8	0.1972	0.5630	0.1219	0.05155
9	0.2556	0.7884	0.1484	0.06081
10	0.3259	1.078	0.1789	0.07106
11	0.4094	1.444	0.2137	0.08241
12	0.5075	1.902	0.2534	0.09497
13	0.6214	2.465	0.2985	0.1089
14	0.7602	3.152	0.3493	0.1242
16	1.141	5.029	0.4741	0.1598
18	1.687	7.827	0.6382	0.2034
20	2.418	11.90	0.8522	0.2571
30	8.498	63.47	2.860	0.7446
40	17.59	191.8	6.489	1.694
50	28.91	422.6	11.59	3.141
60	42.00	775.7	17.99	5.066
70	57.00	1269	25.57	7.440
80	74.22	1923	34.28	10.24
90	93.77	2761	44.13	13.45
100	115.4	3805	55.11	17.05
110	138.6	5074	67.19	21.05
120	162.9	6581	80.28	25.44
130	187.8	8334	94.30	30.19
140	212.8	10340	109.1	35.29
150	237.7	12590	124.7	40.73
160	262.2	15090	140.8	46.48
170	286.1	17830	157.4	52.51
180	309.3	20810	174.4	58.81
190	331.7	24020	191.7	65.35
200	353.3	27440	209.3	72.11
210	373.9	31080	227.0	79.06
220	393.7	34920	244.9	86.20
230	412.6	38950	262.8	93.49
240	430.6	43170	280.8	100.9
250	447.7	47560	298.7	108.5
260	463.9	52120	316.6	116.1
270	479.3	56830	334.4	123.9
280	494.0	61700	352.1	131.7
290	507.8	66710	369.6	139.6
298.15	518.6 ± 0.4^b	70890 ± 30	383.9 ± 0.2	146.1 ± 0.1
300	521.0	71850	387.1	147.6
310	533.4	77130	404.4	155.6

<i>T</i> , К	<i>C_p^o(T)</i> , Дж/(К моль)	<i>H^o(T)–H^o(0)</i> , Дж/моль	<i>S^o(T)</i> , Дж/(К моль)	<i>Φ^{oa}(T)</i> , Дж/(К моль)
320	545.2	82520	421.50	163.6
330	556.3	88030	438.4	171.7
340	566.9	93650	455.2	179.8
350	576.9	99360	471.8	187.9
400	619.6	129330	551.7	228.4
500	678.1	194460	696.8	307.9
600	714.7	264230	824.0	383.6
700	739.4	337000	936.1	454.7
800	757.7	411900	1036	521.2
900	772.6	488400	1126	583.5
1000	785.9	566400	1208	641.9
1100	798.3	645600	1284	696.9
1200	810.1	726000	1354	748.8
1300	821.6	807600	1419	797.8
1400	832.7	890300	1480	844.4
1500	843.3	974100	1538	888.8
1600	853.4	1059100	1593	931.1
1700	863.0	1144800	1645	971.6
1800	872.1	1231600	1695	1010
1865	877.6	1288422	1726	1035

Примечание. Курсивом выделены значения теплоемкости, полученные в результате экстраполяции уравнения (1) к абсолютному нулю.

^a $\Phi^o(T) = \Delta S^o(T) - [H^o(T) - H^o(0)]/T$.

^b соответствует стандартному отклонению.

Таблица 4. Коэффициенты уравнений, описывающих температурную зависимость параметров кристаллической решетки LaMgAl₁₁O₁₉

Кристаллографический параметр	Коэффициенты уравнения		<i>R</i> ²
	<i>q</i> ₀	<i>q</i> ₁ × 10 ⁵	
<i>a</i> , Å	5.5795	4.0766	0.9948
<i>c</i> , Å	21.897	25.7	0.9985
<i>V</i> , Å ³	590.28	1565.8	0.9964

пии $H^o(T) - H^o(0)$ и приведенная энергия Гиббса $\Phi^o(T)$ в интервале температур 0–1865 К (табл. 3).

Данные по теплоемкости в области высоких температур (330–1865 К) также могут быть описаны с помощью уравнения Майера–Келли [26]:

$$C_p = 718.19 + 0.08929278 \times T - 20996704 \times T^{-2}$$

$(R^2 = 0.9998).$

(3)

При этом разброс экспериментальных точек относительно сглаженных по уравнению (3) значений не превышает 0.5% (рис. S5).

Уравнение (3) описывает теплоемкость в области высоких температур более достоверно по сравнению

с уравнением, приведенным в [18], поскольку оно получено после согласования данных ДСК с величинами, определенными адиабатической калориметрией. Хотя можно отметить, что отклонение данных по теплоемкости, рассчитанных по уравнению (3), от значений, приведенных в [18], не превышает систематических ошибок метода ДСК.

Термическое расширение

В результате изучения образца LaMgAl₁₁O₁₉ методом высокотемпературной рентгеновской дифракции при семи значениях температуры (рис. S6) рассчитаны температурные зависимости параметров элементарной ячейки *a*, *c* и *V* гексаалюмината маг-

ния-лантана со структурой магнетоплюмбита, представленные на рис. 4 и в табл. S5.

Изменения параметров элементарной ячейки $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ удовлетворительно описываются линейным уравнением $a_T = q_0 + q_1 \times T$, коэффициенты которого приведены в (табл. 4).

На основе полученной температурной зависимости объема элементарной ячейки рассчитан коэффициент объемного термического расширения $\beta_{298} = 1/V(298 \text{ K}) \times (dV/dT) = 2.62 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Для поликристаллических образцов веществ с анизотропной структурой коэффициент линейного термического расширения можно оценить следующим образом: $\alpha_{298} \sim 1/3\beta_{298} = 8.73 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Полученное нами методом высокотемпературной рентгеновской дифракции значение КТР $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ (8.73 K^{-1}) удовлетворительно согласуется с результатами дилатометрии ($7.73 \times 10^{-6} - 10.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [1, 4, 10, 11]).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате изучения теплоемкости образца $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ со структурой магнетоплюмбита в широком температурном диапазоне получены температурные зависимости термодинамических свойств в интервале 0–1865 К. На основании полученных данных сделан вывод об отсутствии фазовых превращений в изученном диапазоне температур. Методом высокотемпературной рентгеновской дифракции определены характеристики термического расширения $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ в области 298–1173 К. Полученные результаты подтверждают перспективность использования этого соединения в качестве компонента термобарьерных материалов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы статьи благодарны О.Н. Кондратьевой (ИОНХ РАН) за помощь в проведении математической обработки полученных данных по теплоемкости.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-13-00051.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lu H., Wang C.-A., Zhang C. // *Ceram. Int.* 2014. V. 40. P. 16273.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.07.064>
2. Iyi N., Takekawa S., Kimura S. // *J. Solid State Chem.* 1989. V. 83. P. 8.

3. Gadow R., Lischka M. // *Surf. Coat. Technol.* 2002. V. 151–152. P. 392.
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01642-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01642-5)
4. Bansal N.P., Zhu D. // *Surf. Coat. Technol.* 2008. V. 202. P. 2698.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.09.048>
5. Zhang Y., Wang Y., Jarligo M.O. et al. // *Opt. Lasers Eng.* 2008. V. 46. P. 601.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2008.04.001>
6. Friedrich C., Gadow R., T. Schirmer T. // *J. Therm. Spray Technol.* 2001. V. 10. P. 592.
<https://doi.org/10.1361/105996301770349105>
7. Liu Z.-G., Ouyang J.-H., Zhou Y. // *J. Alloys Compd.* 2009. V. 472. P. 319.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.04.042>
8. Liu Z.-G., Ouyang J.-H., Zhou Y. et al. // *Philos. Mag.* 2009. V. 89. P. 553.
<https://doi.org/10.1080/14786430802684126>
9. Lee K.N. 4.4.2. Protective coatings for gas turbine // <https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/gas-turbine-handbook/4-4-2.pdf>
10. Wang Y.-H., Ouyang J.-H., Liu Zh.-G. // *J. Alloys Compd.* 2009. V. 485. P. 734.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.06.068>
11. Chen X., Gu L., Zou B. et al. // *Surf. Coat. Technol.* 2012. V. 206. P. 2265.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.09.076>
12. Cao X.Q., Zhang Y.F., Zhang J.F. et al. // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2008. V. 28. P. 1979.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.01.023>
13. Chen X., Zhao Y., Fan X. et al. // *Surf. Coat. Technol.* 2011. V. 205. P. 3293.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.11.059>
14. Doležal V., Nádherný L., Rubešová K. et al. // *Ceram. Int.* 2019. V. 45. P. 11233.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.02.162>
15. Lefebvre D., Thery J., Vivien D. // *J. Am. Ceram. Soc.* 1986. V. 69(11). P. C-289.
<https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1986.tb07380.x>
16. Kahn A., Lejus A.M., Madsac M. et al. // *J. Appl. Phys.* 1981. V. 52. P. 6864.
<https://doi.org/10.1063/1.328680>
17. Lu X., Yuan J., Xu M. et al. // *Ceram. Int.* 2021. V. 47. P. 28892.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.07.050>
18. Гагарин П.Г., Гуськов А.В., Гуськов В.Н. и др. // *Журн. неорганич. химии.* 2023. Т. 68(11). С. 1607.
Gagarin P.G., Guskov A.V., Guskov V.N. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2023. V. 68(11). P. 1599.
<https://doi.org/10.1134/S0036023623602064>
19. Lu H., Wang C., Zhang C., Tong S. // *J. Europ. Ceram. Soc.* 2015. V. 35. P. 1297.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.10.030>

20. Friedrich C., Gadow R., Schirmer T. // Proc. of the 1st Int. Therm. Spray Conf. 2000. P. 1219.
<https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2000p1219>
21. Guskov V.N., Tyurin A.V., Guskov A.V. et al. // Ceram. Int. 2020. V. 46. P. 12822.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.02.052>
22. Тюрин А.В., Хорошилов А.В., Гуськов В.Н. и др. // Журн. неорган. химии. 2018. Т. 63(12). С. 1583.
<https://doi.org/10.1134/S0044457X18120218>
23. Voskov A.L., Kutsenok I.B., Voronin G.F. // Calphad. 2018. V. 16. P. 50.
<https://doi.org/10.1016/j.calphad.2018.02.001>
24. Voronin G.F., Kutsenok I.B. // J. Chem. Eng. Data. 2013. V. 58. P. 2083.
<https://doi.org/10.1021/je400316m>
25. Prohaska T., Irrgeher J., Benefield J. et al. // Pure Appl. Chem. 2022. V. 94(5). P. 573.
<https://doi.org/10.1515/pac-2019-0603>
26. Maier C.G., Kelley K.K. // J. Am. Chem. Soc. 1932. V. 54. P. 3243.
<https://doi.org/10.1021/ja01347a029>

HEAT CAPACITY AND THERMAL EXPANSION OF $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$

P. G. Gagarin^{a,*}, A. V. Guskov^a, V. N. Guskov^a, G. E. Nikiforova^a, K. S. Gavrcihev^a

^aKurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of RAS,
Leninsky pr. 31, Moscow, 119991, Russia

*e-mail: gagarin@igic.ras.ru

The heat capacity of $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ with a magnetoplumbite structure was measured in the temperature range of 7–1865 K using relaxation, adiabatic and differential scanning calorimetries. Obtained temperature dependences of the heat capacity are consistent based on adiabatic calorimetry data. Thermodynamic functions (entropy, enthalpy change, reduced Gibbs energy) in the range 0–1865 K are calculated from fitted values. Thermal expansion in the range of 300–1200 K was studied by high-temperature X-ray diffraction and the coefficient of thermal expansion of $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ was calculated.

Keywords: hexaaluminate, magnetoplumbite, heat capacity, thermodynamics, thermal expansion