

УДК 536.666:544.344.015.2.014

О. И. Салычиц, ассистент (БГТУ); С. Е. Орехова, доцент (БГТУ)

### КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ТЕПЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ РЕАКЦИЙ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ АЛЮМИНАТОВ И АЛЮМОСИЛИКАТОВ В СИСТЕМАХ MgO (MnO, FeO, CuO, Cu<sub>2</sub>O, ZnO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub>

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) определены тепловые эффекты реакций фазообразования твердых растворов алюминатов  $Mg_{1-x}Al_xO_4$  ( $0,10 < x < 0,75$ ) и алюмосиликатов  $Mg_{2-y}Al_4Si_5O_{18}$  ( $0,5 < y < 1,5$ ) в системах MgO (ЭО, Э<sub>2</sub>O) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> (Э – Mn (II), Fe (II), Cu (I, II) и Zn). Изучена кинетика процессов фазообразования твердых растворов алюминатов  $Mg_{1-x}Al_xO_4$  и алюмосиликатов  $Mg_{2-y}Al_4Si_5O_{18}$  в исследуемых системах и рассчитаны значения энергий активации данных процессов. Проведено сопоставление кинетических характеристик и тепловых эффектов реакций фазообразования твердых растворов алюминатов и алюмосиликатов в системах MgO (MnO, FeO, CuO, Cu<sub>2</sub>O, ZnO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> (Э – Mn (II), Fe (II), Cu (I, II) и Zn).

Thermal effects of the processes of phase formation of aluminates  $Mg_{1-x}Al_xO_4$  ( $0,10 < x < 0,75$ ) and aluminosilicates  $Mg_{2-y}Al_4Si_5O_{18}$  ( $0,5 < y < 1,5$ ) hard solutions in the systems MgO (ЭО, Э<sub>2</sub>O) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> (Э – Mn (II), Fe (II), Cu (I, II) и Zn) are determined by method of differential scanning calorimetry (DSC). Kinetics of processes of phases formation of aluminates  $Mg_{1-x}Al_xO_4$  and aluminosilicates  $Mg_{2-y}Al_4Si_5O_{18}$  hard solutions in the investigated systems are studied and the energy of activation of these processes are calculated. Correlation between kinetics characteristics and thermal effects of the processes of phases formation of aluminates and aluminosilicates hard solutions in the systems MgO (MnO, FeO, CuO, Cu<sub>2</sub>O, ZnO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> (Э – Mn (II), Fe (II), Cu (I, II) и Zn) are established.

**Введение.** Диаграмма состояния системы MgO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> является физико-химической основой для разработки большого числа керамических и огнеупорных материалов, в ряду которых особое место занимают керамические кордиеритсодержащие материалы с низким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) и высоким удельным объемным электрическим сопротивлением ( $\rho_V$ ). Однако повышенная пористость ( $\Pi_0$ ), недостаточные механическая прочность ( $\sigma_{изг}$ ) и плотность ( $\rho_{каж}$ ) керамики на основе алюмосиликата магния  $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$  (кордиерита), высокая энергоёмкость производства (1350–1450°C) ограничивают ее применение.

С целью расширения возможностей использования керамических алюмосиликатных материалов нами проведено исследование влияния модифицирования магнийалюмосиликатной системы, которая соответствует со-

ставу  $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$ , на свойства полученных на ее основе материалов [1–3]. Синтезированы керамические материалы при частичном и полном эквимолекулярном замещении MgO в составе  $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$  на оксиды металлов ЭО, Э<sub>2</sub>O (Э – Mn (II), Fe (II), Cu (I и II), Zn), электронные конфигурации которых отличаются разным числом электронов на *d*-подуровне.

Установлено, что физико-химические, тепло- и электрофизические свойства (табл. 1) полученных керамических материалов, синтезированных при более низких температурах по сравнению с алюмосиликатом магния  $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$  (1100–1200°C), улучшаются, а закономерности образования соединений (твердых растворов алюминатов  $Mg_{1-x}Al_xO_4$  ( $0,10 < x < 0,75$ ) и алюмосиликатов  $Mg_{2-y}Al_4Si_5O_{18}$  ( $0,5 < y < 1,5$ )) в модифицированных магнийалюмосиликатных системах MgO (MnO, FeO, CuO, Cu<sub>2</sub>O, ZnO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> находятся в зависимости от природы модифицирующих оксидов ЭО и Э<sub>2</sub>O.

Таблица 1

Свойства керамических материалов, полученных на основе систем  
MgO (MnO, FeO, CuO, Cu<sub>2</sub>O, ZnO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub>

Система	Температура синтеза, °С	ТКЛР · 10 <sup>6</sup> , К <sup>-1</sup>	$\rho_V$ , Ом·см	$\sigma_{изг}$ , МПа	$\rho_{каж} \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>
MgO – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – SiO <sub>2</sub>	1350–1450	1,0–3,0	$10^9$ – $10^{10}$	50,0	1,85–2,10
MgO (MnO) – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – SiO <sub>2</sub>	1050–1100	0,7–2,2	$(0,3–3,5) \cdot 10^{11}$	58,9–91,5	2,45–2,91
MgO (FeO) – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – SiO <sub>2</sub>	1150–1200				
MgO (CuO) – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – SiO <sub>2</sub>	1100–1150				
MgO (Cu <sub>2</sub> O) – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – SiO <sub>2</sub>	1100–1150				
MgO (ZnO) – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – SiO <sub>2</sub>	1150–1200				

Отсутствие в литературных источниках термодинамических характеристик твердых растворов алюминатов  $Mg_{1-x}\text{Э}_x\text{Al}_2\text{O}_4$  и алюмосиликатов  $Mg_{2-y}\text{Э}_y\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$  существенно усложняет проведение термодинамического анализа и не позволяет определить термодинамическую возможность реакций фазообразования в исследуемых модифицированных магнийалюмосиликатных системах  $MgO$  ( $MnO$ ,  $FeO$ ,  $CuO$ ,  $Cu_2O$ ,  $ZnO$ ) –  $Al_2O_3$  –  $SiO_2$ .

Все вышесказанное обуславливает актуальность и необходимость проведения исследований, цель которых – определение стандартных теплот образования твердых растворов алюминатов  $Mg_{1-x}\text{Э}_x\text{Al}_2\text{O}_4$  и алюмосиликатов  $Mg_{2-y}\text{Э}_y\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$  в модифицированных магнийалюмосиликатных системах  $MgO$  ( $MnO$ ,  $FeO$ ,  $CuO$ ,  $Cu_2O$ ,  $ZnO$ ) –  $Al_2O_3$  –  $SiO_2$  и комплексное изучение кинетических характеристик и тепловых эффектов реакций фазообразования  $Mg_{1-x}\text{Э}_x\text{Al}_2\text{O}_4$  и  $Mg_{2-y}\text{Э}_y\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$  в системах  $MgO$  ( $MnO$ ,  $FeO$ ,  $CuO$ ,  $Cu_2O$ ,  $ZnO$ ) –  $Al_2O_3$  –  $SiO_2$ .

**Основная часть.** Составы исследуемых композиций  $(2-X)MgO \cdot X\text{ЭO}(\text{Э}_2\text{O}) \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$  ( $X = 0; 0,5; 1; 1,5; 2$ ), где Э –  $Mn$  (II),  $Fe$  (II),  $Cu$  (II),  $Cu$  (I),  $Zn$ , получены в результате частичной или полной эквивалентной замены  $MgO$  в составе магнийалюмосиликатной системы, соответствующей стехиометрическому содержанию оксидов  $MgO$ ,  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$  в алюмосиликате магнезита ( $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$ ), на оксиды  $MnO$ ,  $FeO$ ,  $CuO$ ,  $Cu_2O$  и  $ZnO$ .

Химический состав исходного немодифицированного керамического материала (серия I) соответствовал химическому стехиометрическому составу (мас. %) алюмосиликата магнезита  $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$ :  $MgO$  – 13,8;  $Al_2O_3$  – 34,9;  $SiO_2$  – 51,3. В качестве основных исходных сырьевых компонентов использовались природные (минеральные) компоненты (глина веселовская, тальк онотский, технический глинозем), а в качестве модифицирующих добавок – химически чистые соединения (карбонат марганца (II), оксид железа (II), оксиды меди (I и II), оксид цинка).

Индексы составов исследуемых модифицированных композиций (M, F, C, C (I) и Z) – это первые буквы в латинском обозначении элементов, образующих модифицирующие оксиды. Цифры от 1 до 4 условно соответствуют постепенному увеличению содержания модифицирующего оксида от 6 до 24 мас. %.

Методами количественного и качественно-рентгенофазового анализа (РФА), ИК-спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием системы электронного зондового энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного EDX химического анализа JED-2201 JEOL установлены законо-

мерности и изучена кинетика процессов фазообразования твердых растворов алюминатов и алюмосиликатов в системах  $MgO$  ( $MnO$ ,  $FeO$ ,  $CuO$ ,  $Cu_2O$ ,  $ZnO$ ) –  $Al_2O_3$  –  $SiO_2$ . Характерной особенностью процесса фазообразования в магнийалюмосиликатных системах, модифицированных оксидами элементов более основной химической природы ( $MnO$ ,  $FeO$ ,  $Cu_2O$ ), является образование соединений алюмосиликатного ряда –  $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$  и твердых растворов  $Mg_{2-y}\text{Э}_y\text{Al}_4\text{Si}_5O_{18}$  ( $0,5 < y < 1,5$ ) высоко- и низкотемпературных модификаций. Качественный фазовый состав исследуемых материалов, модифицированных оксидами более амфотерной природы ( $ZnO$  и  $CuO$ ), характеризуется присутствием твердых растворов алюминатов  $Mg_{1-x}\text{Э}_x\text{Al}_2O_4$  ( $0,10 < x < 0,75$ ) и силикатов цинка и меди (II).

В результате анализа ряда кинетических уравнений [4], соответствующих различным моделям физико-химического взаимодействия, экспериментально установлено, что процессы фазообразования  $Mg_{1-x}\text{Э}_x\text{Al}_2O_4$  и  $Mg_{2-y}\text{Э}_y\text{Al}_4Si_5O_{18}$  в системах  $MgO$  ( $MnO$ ,  $FeO$ ,  $CuO$ ,  $Cu_2O$ ,  $ZnO$ ) –  $Al_2O_3$  –  $SiO_2$  удовлетворительно описываются кинетическим уравнением анти-Гинстлинга-Броунштейна (1) для твердых растворов алюминатов  $Mg_{1-x}\text{Э}_x\text{Al}_2O_4$  и соединений алюмосиликатного  $Mg_{2-y}\text{Э}_y\text{Al}_4Si_5O_{18}$  ряда низкотемпературной модификации и анти-Яндера (2) для твердых растворов алюмосиликатов  $Mg_{2-y}\text{Э}_y\text{Al}_4Si_5O_{18}$  высокотемпературной модификации:

$$1 + \frac{2}{3}\alpha - (1 + \alpha)^{\frac{2}{3}} = K_{АГБ}\tau; \quad (1)$$

$$\left( (1 + \alpha)^{\frac{1}{3}} - 1 \right)^2 = K_{АЯ}\tau, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – степень превращения;  $K_{АГБ}$  и  $K_{АЯ}$  – константы уравнений анти-Гинстлинга-Броунштейна (А-Г-Б) и анти-Яндера (А-Я),  $ч^{-1}$ ;  $\tau$  – время изотермической выдержки, ч.

Установленное соответствие позволяет считать возможным применение соответствующих уравнениям (1) и (2) кинетических диффузионных моделей для описания механизмов лимитирующих стадий процессов фазообразования  $Mg_{1-x}\text{Э}_x\text{Al}_2O_4$  и  $Mg_{2-y}\text{Э}_y\text{Al}_4Si_5O_{18}$  в исследуемых системах [5].

В результате комплекса исследований, проведенных для всех составов  $(2-X)MgO \cdot X\text{ЭO}(\text{Э}_2\text{O}) \times 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$ , получены уравнения реакций фазообразования  $Mg_{1-x}\text{Э}_x\text{Al}_2O_4$  и  $Mg_{2-y}\text{Э}_y\text{Al}_4Si_5O_{18}$  в системах  $MgO$  ( $MnO$ ,  $FeO$ ,  $CuO$ ,  $Cu_2O$ ,  $ZnO$ ) –  $Al_2O_3$  –  $SiO_2$ .

В ходе математической обработки экспериментальных данных с использованием выбран-

ных кинетических уравнений (1) и (2) получены значения констант кинетических уравнений ( $K_{АГБ}$  и  $K_{АЯ}$ ), по температурной зависимости ко-

торых определены значения энергий активации ( $E_A$ ) реакций фазообразования  $Mg_{1-x}\text{Э}_x\text{Al}_2\text{O}_4$  и  $Mg_{2-y}\text{Э}_y\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$ , приведенные в табл. 2–4.

Таблица 2

**Константы кинетических уравнений и энергии активации процессов образования твердых растворов  $Mg_{1-x}\text{Э}_x\text{Al}_2\text{O}_4$  ( $0,10 < x < 0,75$ ), где Э – элемент, образующий модифицирующий оксид**

Индекс состава	Температура обжига, К	$E_A$ , кДж/моль	$K \cdot 10^2$ , ч <sup>-1</sup>	Условное обозначение уравнения
С(І)	1373	112±12	4,33±1,00	А-Г-Б
	1423		3,07±0,04	
	1473		2,23±0,50	
F-1	1423	150±20	2,45±0,50	А-Я
	1450		3,16±0,50	
	1473		3,89±1,00	
С-1	1173	279±15	0,26±0,01	А-Г-Б
	1223		0,93±0,15	
	1273		2,41±0,44	
Z-1	1423	282±13	2,04±0,50	А-Г-Б
	1450		3,18±0,40	
	1473		3,26±1,00	

Таблица 3

**Константы кинетических уравнений и энергии активации процессов образования твердых растворов  $Mg_{2-y}\text{Э}_y\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$  ( $0,5 < y < 1,5$ ) низкотемпературной модификации, где Э – элемент, образующий модифицирующий оксид**

Индекс состава	Температура обжига, К	$E_A$ , кДж/моль	$K \cdot 10^2$ , ч <sup>-1</sup>	Условное обозначение уравнения
І	1423	254±40	0,42±0,09	А-Г-Б
	1450		0,63±0,08	
	1473		0,91±0,02	
F-1	1423	140±8	2,21±0,50	А-Я
	1450		2,73±0,06	
	1473		3,24±0,80	
С(І)	1373	303±40	0,51±0,70	А-Г-Б
	1450		1,31±0,07	
	1473		4,27±1,00	
Z-1	1423	140±16	1,01±0,50	А-Г-Б
	1450		1,26±0,07	
	1473		1,47±0,40	

Таблица 4

**Константы кинетических уравнений и энергии активации процессов образования твердых растворов  $Mg_{2-y}\text{Э}_y\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$  ( $0,5 < y < 1,5$ ) высокотемпературной модификации, где Э – элемент, образующий модифицирующий оксид**

Индекс состава	Температура обжига, К	$E_A$ , кДж/моль	$K \cdot 10^2$ , ч <sup>-1</sup>	Условное обозначение уравнения
І	1473	811±90	0,38±0,80	А-Я
	1500		1,23±0,09	
	1523		3,42±0,90	
С(І)	1373	759±90	0,06±0,03	А-Я
	1423		0,54±0,02	
	1473		4,80±1,00	
M-1	1373	331±60	0,50±0,25	А-Г-Б
	1423		3,78±0,80	
	1473		2,30±0,80	
F-1	1473	1040±75	0,25±0,09	А-Я
	1500		1,13±0,05	
	1523		2,57±0,35	

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с использованием дифференциального сканирующего калориметра TGA/DSC 1HT/319 системы STAR<sup>с</sup> компании METTLER TOLEDO (Германия) с привлечением программного обеспечения STAR<sup>с</sup> SW 9.20 определены тепловые эффекты реакций фазообразования  $Mg_{1-x}Al_2O_4$  и  $Mg_{2-y}Al_4Si_5O_{18}$ .

На основании экспериментально определенных величин тепловых эффектов ( $\Delta H^{\circ}_T$ ) реакций фазообразования твердых растворов алюминатов  $Mg_{1-x}Al_2O_4$  и алюмосиликатов  $Mg_{2-y}Al_4Si_5O_{18}$  по известной методике [6–8] с привлечением справочных данных [4, 6, 9, 10] рассчитаны отсутствующие в литературных источниках стандартные теплоты образования ( $\Delta H^{\circ}_f, 298$ ) твердых растворов  $Mg_{1-x}Al_2O_4$  и  $Mg_{2-y}Al_4Si_5O_{18}$ , представленные в табл. 5.

Сравнение значений стандартных теплот образования ( $\Delta H^{\circ}_f, 298$ ) алюминатов  $Al_2O_3$  (табл. 6), рассчитанных в соответствии с указанной методикой, со значениями, представленными в справочной литературе, подтверждает допустимость используемого ме-

тода и позволяет считать результаты расчета достаточно точными. Суммарная погрешность при расчете стандартной теплоты образования соединения с учетом погрешностей, вносимых при экспериментальном определении тепловых эффектов реакций фазообразования и при использовании данных справочной литературы, может достигать 5–15%.

Несмотря на отсутствие принципиальной корреляционной связи между кинетическими и термодинамическими характеристиками различных процессов, авторами [6] приводятся приближенные правила и уравнения, позволяющие установить взаимосвязь величины активационного барьера ( $E_A$ ) с абсолютным значением теплового эффекта ( $\Delta H^{\circ}_T$ ) для серий однотипных реакций.

На основании результатов высокотемпературных калориметрических исследований проведено сопоставление кинетических характеристик и тепловых эффектов реакций фазообразования твердых растворов алюминатов  $Mg_{1-x}Al_2O_4$  и алюмосиликатов  $Mg_{2-y}Al_4Si_5O_{18}$  в исследованных системах MgO (MnO, FeO, CuO, Cu<sub>2</sub>O, ZnO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub>.

Таблица 5

**Сводная таблица расчетных значений стандартных теплот образования твердых растворов алюминатов и алюмосиликатов**

Индекс состава	Формула соединения	Расчетное значение стандартной теплоты образования $-\Delta H^{\circ}_f, 298$ , кДж/моль	Стандартный тепловой эффект процесса фазообразования $-\Delta H^{\circ}_T$ , кДж	Температура процесса фазообразования $T$ , К
M-1	$Mn_{0,5}Mg_{0,5}Al_2O_4$	2259	7,15	1141±13
F-1	$Fe_{0,245}Mg_{0,755}Al_2O_4$	2209	8,50	1261±20
C-1	$Cu_{0,5}Mg_{0,5}Al_2O_4$	2301	5,54	1123±20
C(I)	$Cu_{0,13}Mg_{0,87}Al_2O_4$	2348	18,44	1112±29
Z-1	$Zn_{0,45}Mg_{0,55}Al_2O_4$	2090	13,03	1139±14
M-1	$Mn_{0,88}Mg_{1,12}Al_4Si_5O_{18}$	9066	39,73	1293±7
F-1	$Fe_{0,49}Mg_{1,51}Al_4Si_5O_{18}$	9909	8,50	1473±28
F-4	$Fe_2Al_4Si_5O_{18}$	9218	8,39	1255±20
M-4	$Mn_3Al_2Si_2O_{10}$	5135	4,40	1251±15

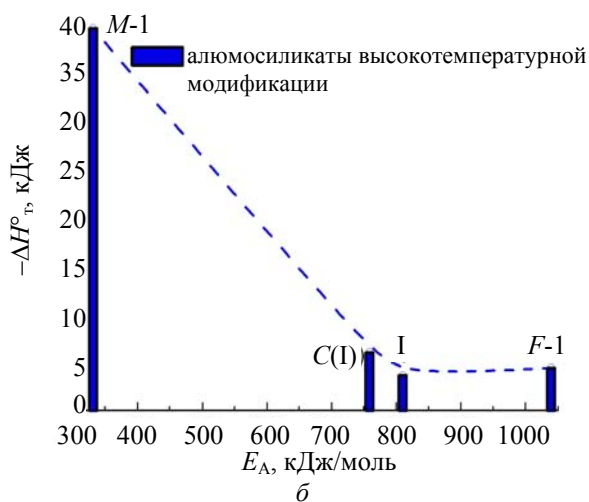
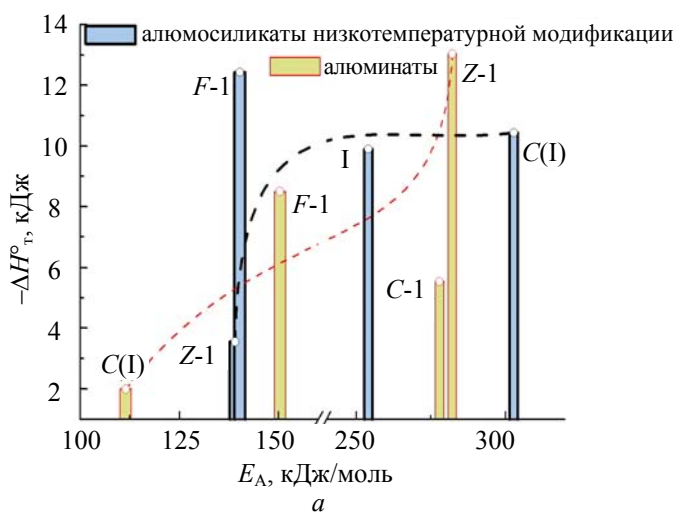
Таблица 6

**Расчетные и справочные значения стандартных теплот образования алюминатов**

Соединение	Расчетное значение $-\Delta H^{\circ}_f, 298$ , кДж/моль	Справочное значение [4] $-\Delta H^{\circ}_f, 298$ , кДж/моль	Отклонение расчетных значений от справочных, %
$MgAl_2O_4$	2486	2313	7,4
$MnAl_2O_4$	2080	2098	0,9
$FeAl_2O_4$	2018	1982	1,8
$CuAl_2O_4$	2029	1808	12,2
$ZnAl_2O_4$	2073	2067	0,3

Энергия активации для процессов фазообразования твердых растворов алюминатов  $Mg_{1-x}Al_xAl_2O_4$  и алюмосиликатов низкотемпературной модификации  $Mg_{2-y}Al_yAl_4Si_5O_{18}$  возрастает при увеличении абсолютного значения величины теплового эффекта исследуемого процесса (рисунок, а). Такое соотношение позволяет сделать вывод, что незначительная величина теплового эффекта таких реакций не оказывает влияния на кинетику процесса в заметной степени.

Для реакций фазообразования алюмосиликатов высокотемпературной модификации  $Mg_{2-y}Al_yAl_4Si_5O_{18}$ , протекающих при более высоких температурах и сопровождающихся выделением большего количества теплоты, установлено уменьшение энергии активации процесса при увеличении абсолютной величины его теплового эффекта (рисунок, б).



Соотношение между тепловыми эффектами и энергиями активации реакций фазообразования твердых растворов алюминатов и алюмосиликатов низкотемпературной модификации (а) и твердых растворов алюмосиликатов высокотемпературной модификации (б)

**Заключение.** Таким образом, в результате комплекса проведенных исследований экспериментально определены тепловые эффекты реакций фазообразования в модифицированных магний-алюмосиликатных системах MgO (MnO, FeO, CuO, Cu<sub>2</sub>O, ZnO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> методом ДСК; определены отсутствующие в справочной литературе стандартные теплоты образования твердых растворов алюминатов  $Mg_{1-x}Al_xAl_2O_4$  и алюмосиликатов  $Mg_{2-y}Al_yAl_4Si_5O_{18}$ ; экспериментально установлено, что процессы фазообразования в исследуемых системах удовлетворительно описываются кинетическими уравнениями анти-Гинстлинга-Броунштейна (А-Г-Б) для твердых растворов алюминатов  $Mg_{1-x}Al_xAl_2O_4$  и соединений алюмосиликатного ряда низкотемпературной модификации  $Mg_{2-y}Al_yAl_4Si_5O_{18}$  и анти-Яндера (А-Я) для твердых растворов алюмосиликатов высокотемпературной модификации  $Mg_{2-y}Al_yAl_4Si_5O_{18}$ ; получены значения констант кинетических уравнений и энергий активации исследуемых реакций; установлено соотношение между кинетическими характеристиками и тепловыми эффектами реакций фазообразования твердых растворов алюминатов  $Mg_{1-x}Al_xAl_2O_4$  и алюмосиликатов  $Mg_{2-y}Al_yAl_4Si_5O_{18}$  в исследуемых модифицированных магний-алюмосиликатных системах MgO (MnO, FeO, CuO, Cu<sub>2</sub>O, ZnO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub>.

Термодинамические и кинетические характеристики исследуемых реакций фазообразования  $Mg_{1-x}Al_xAl_2O_4$  и  $Mg_{2-y}Al_yAl_4Si_5O_{18}$  в системах MgO (MnO, FeO, CuO, Cu<sub>2</sub>O, ZnO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> в комплексе могут быть использованы как при проведении научных исследований модифицированных магний-алюмосиликатных систем, так и при разработке технологии получения на их основе термостойких и электроизоляционных керамических материалов.

### Литература

- Салычиц, О. И. Влияние оксидов железа (II) и стронция на структуру и свойства магний-алюмосиликатной керамики / О. И. Салычиц, Е. М. Дятлова // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2007. – № 3. – С. 104–107.
- Салычиц, О. И. Температурный коэффициент линейного расширения керамических материалов, образующихся в системе MgO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub>, модифицированной оксидами MnO, FeO, Cu<sub>2</sub>O, CuO и ZnO, при нагревании / О. И. Салычиц, С. Е. Орехова // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорган. в-в. – 2009. – Вып. XVII. – С. 12–16.
- Салычиц, О. И. Влияние оксидов 3d-элементов на прочностные свойства керамики на основе  $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$  / О. И. Салычиц, С. Е. Орехова, А. В. Дорожко // Химия твердого тела и

функциональные материалы – 2008: тез. докл. Всеросс. конф., Екатеринбург, 21–24 окт. 2008 г. / Рос. акад. наук; редкол.: Г. П. Швейкин [и др.]. – Екатеринбург, 2008. – С. 311.

4. Третьяков, Ю. Д. Твердофазные реакции / Ю. Д. Третьяков. – М.: Химия, 1978. – 360 с.

5. Салычиц, О. И. Кинетика фазообразования в системе MgO (ZnO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> / О. И. Салычиц, С. Е. Орехова // Свиридовские чтения: сб. ст. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: Т. Н. Воробьева [и др.]. – Минск, 2008. – Вып. 4. – С. 38–43.

6. Бабушкин, В. И. Термодинамика силикатов / В. И. Бабушкин, Г. М. Матвеев, О. П. Мчедлов-Петросян. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во лит-ры по стр-ву, 1972. – 352 с.

7. Иванова, Л. И. Зависимость между теплоемкостью твердых веществ и температурой

первого фазового перехода / Л. И. Иванова // Журнал физической химии. – 1961. – Т. XXXV, № 9. – С. 2120.

8. Ландия, Н. А. Расчет высокотемпературных теплоемкостей твердых неорганических веществ по стандартной энтропии / Н. А. Ландия. – Тбилиси: Изд-во Груз. ССР, 1962. – 224 с.

9. Термические константы веществ: в 10 вып. / редкол.: В. Глушко (отв. ред.) [и др.]. – М.: ВИНТИ, 1966–1982. – Вып. IV, ч. 1. – 1973. – 510 с.; Вып. V. – 1971. – 532 с.; Вып. VI, ч. 1. – 1972. – 370 с.; Вып. IX. – 1979. – 574 с.

10. Волков, А. И. Большой химический справочник / А. И. Волков, И. М. Жарский. – Минск: Современная школа, 2005. – 608 с.

*Поступила 31.03.2010*