

УДК 666.3-13

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

© Д-р техн. наук И.А. Левицкий, канд. техн. наук О.В. Кичкайло, А.И. Тригубович

Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь



Левицкий И.А.



Кичкайло О.В.

Приведены результаты исследований по модификации керамики на основе литий-алюмосиликатной системы добавками, обеспечивающими интенсификацию процессов спекания и повышение эксплуатационных свойств образцов. Установлено влияние добавок серпентинита, кремнеземного стекловолокна, электрокорунда и Cr_2O_3 на физико-химические (водопоглощение, кажущаяся плотность, ТКЛР, механическая прочность при изгибе, термостойкость) и электрофизические (диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь) свойства.

Ключевые слова: литийалюмосиликатная матрица, спекание, кажущаяся плотность, водопоглощение, температурный коэффициент линейного расширения, механическая прочность при изгибе, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь.

Knowledge on the modification of ceramics based on the lithium-aluminosilicate system with modifying additives that provide an intensification of sintering processes and increase the operational properties of samples are presented. The effects of serpentinite, silica glass fiber, electrocorundum, and Cr_2O_3 additives upon the physico-chemical (water absorption, thermal expansion coefficient, mechanical bending strength) and electro-physical (dielectric capacity, loss-angle tangent) properties were established.

Keywords: lithium-aluminosilicate matrix, sintering, apparent volume weight, water absorption, thermal expansion coefficient, mechanical bending strength, dielectric capacity, loss-angle tangent.

Введение

В результате ранее проведенных нами исследований [1] синтезирована термостойкая керамика на основе системы $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ методом шликерного литья в пористые формы, а впоследствии проведена интенсификация процесса ее спекания путем ввода ряда добавок [2]. Установлена эффективность использования апатитового концентрата в качестве рациональной составляющей. Оптимальным признан состав массы 21АК-5, включающий следующие компоненты, %¹: каолин просяновский марки КС-1 — 43,6 (ГОСТ 21286);

песок кварцевый марки ВС-050-1 (ГОСТ 22551) — 15,5; карбонат лития марки ЛУ-1 (ТУ 6-09-3728-83) — 15,0; технический глинозем марки ГК-2 (ГОСТ 30559) — 4,6; огнеупорная глина «Керамик-Веско» (ТУ У 14.2-00282049-003) — 16,3; апатитовый концентрат месторождения «Олений ручей» (ГОСТ 22275) — 5,0. Область составов ограничивается следующим содержанием оксидов, %: 6,82 Li_2O ; 55,23 SiO_2 ; 29,50 Al_2O_3 ; 0,37 TiO_2 ; 0,45 Fe_2O_3 ; 3,63 CaO ; 0,37 MgO ; 0,31 Na_2O ; 0,95 K_2O и 2,37 P_2O_5 .

Образцы, полученные из данной массы, при температуре обжига 1200 °С обеспечили водопоглощение 3,2–3,6 %; кажущаяся плотность их составляет 2000–2050 кг/м³; открытая пористость — 6,8–7,2 %; механическая прочность при

¹Здесь и далее по тексту, если не оговорено особо, указано массовое содержание, %.

сжатии — 71,2—73,2 МПа, ТКЛР — минус $(0,03—0,05) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Кристаллическая составляющая данного состава представлена твердыми растворами β -сподумена и β -эвкриптита в сочетании с муллитом, кварцем, α -корундом и псевдололастонитом.

Задачей данных исследований явилось получение изделий на основе состава 21АК-5 методом полусухого прессования с обеспечением повышенных значений физико-химических свойств за счет введения следующих модификаторов: серпентинита, электрокорунда, рубленого кремнеземного стекловолокна и Cr_2O_3 .

Указанные модификаторы вводились с целью снижения водопоглощения и ТКЛР образцов, повышения их механической прочности при изгибе, термостойкости и электрофизических свойств.

Методика эксперимента и исходные материалы

В качестве матрицы использована керамическая масса 21АК-5. Модифицирующими добавками являлись следу-

ющие компоненты: серпентинит Светлогорского месторождения (Россия), рубленое кремнеземное стекловолокно марки PS-23 ТУ 5952-153-05786904 (ОАО «Полоцк-Стекловолокно»), оксид хрома (III) (ТУ 6-09-4272) и электрокорунд белый марки 25А (ГОСТ 28818), которые добавлялись индивидуально при помоле составляющих массы. Указанные модификаторы вводились в следующих количествах сверх 100 % составляющих исходной массы: серпентинит и электрокорунд — 1,5; 5 и 10 %; кремнеземное стекловолокно — 0,5; 1; 1,5 и 3 % и Cr_2O_3 — 0,5; 1 и 3,0 %.

Выбор указанных добавок определялся их положительным влиянием на эксплуатационные характеристики, что установлено по литературным источникам [3—6].

В статье принято следующее обозначение составов: цифра 21 — соответствует исходной матрице, далее следует обозначение добавок и их количество: ЭК — электрокорунд; С — серпентинит; Х — оксид хрома (III); КВ — кремнеземное стекловолокно. Записываемые через дефис цифры указывают на количественное содержание

Таблица 1. Химический состав исходных сырьевых компонентов и добавок-минерализаторов

Наименование компонента	Наименование оксидов и их содержание, %										
	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	Li_2O	другие оксиды	ППП
Каолин просьяновский КС-1	49,72	34,75	0,42	0,50	0,56	0,31	0,23	1,00	—	—	12,51
Глина «Керамик-Веско»	56,54	29,68	0,62	0,80	0,70	0,75	0,45	1,73	—	—	8,73
Карбонат лития ЛУ-1	—	—	—	—	—	—	—	—	38,0	—	62,0
Песок кварцевый ВС-05-1	98,50	0,12	0,19	0,01	0,13	0,25	0,40	0,30	—	—	0,10
Глинозем технический ГК-2	0,10	99,45	—	0,05	—	—	0,10	0,10	—	—	0,20
Апатитовый концентрат месторождения «Олений ручей»	—	1,40	—	0,50	53,0	0,20	0,60	0,30	—	P_2O_5 — 39,6; F^- — 2,80	1,60
Электрокорунд белый 25А	0,10	99,40	—	0,10	—	—	0,20	—	—	—	0,20
Кремнеземное волокно PS-23 (9)	98,00	1,80	—	—	—	—	—	—	—	—	0,20
Серпентинит	41,24	0,53	—	5,93	0,53	37,72	0,11	0,02	—	Cr_2O_3 — 0,33; NiO — 0,27; MnO — 0,08; Co_2O_3 — 0,08;	13,16
Cr_2O_3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Cr_2O_3 — 99,98	0,02

модифицирующей добавки. Химический состав используемых при исследованиях материалов приведен в табл. 1.

Приготовление исследованных масс производилось по шликерной технологии совместным мокрым помолом составляющих компонентов в микрошаговой мельнице Speedy (Италия) с использованием алюбитовых барабана и мелющих тел до остатка на сите № 0056 (10085 отв./см²) в количестве 1 % при влажности суспензии 45–48 %. Полученные шликеры подвергались сушке с последующим измельчением и рассевом на ситах, обеспечивающим следующие фракции по размеру зерен, мм, в %: менее 0,125 — 5; (0,25–0,125) — 37; (0,50–0,25) — 55; более 0,5 — 3. Далее приготовленные порошки смешивались и увлажнялись до влажности 5–6 %, подвергались вылеживанию для ее усреднения в течение 7 суток. Образцы изготавливались методом полусухого прессования в металлические формы в виде плиток размером (50×50×5) мм при удельном давлении прессования 10 МПа. Затем они подвергались сушке при температуре 110 ± 5 °С до влажности 0,5 % с последующим обжигом при температуре 1100–1250 °С с шагом 50 °С и выдержкой при максимальной температуре 1 ч.

В работе применялись стандартные методы анализа физико-химических свойств образцов керамических изделий. Определение линейной усадки керамических масс осуществлялось по ГОСТ 19606.20. Водопоглощение и кажущаяся плотность исследовались по ГОСТ 4071.2 (ИСО 8895). Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) в диапазоне температур 20–400 °С определялся с помощью электронного dilatометра DIL 402 PC (NETSCH, Германия) по ГОСТ 10978. Термостойкость образцов оценивалась по количеству термоциклов (350–20 °С) без появления видимых дефектов согласно ГОСТ 47.5. Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь проводилось на измерителе иммитанса E7-14 по ГОСТ 30241.

Экспериментальная часть

Опытные образцы изделий, обожженные при соответствующей температуре, характеризовались равномерной окраской светло-бежевого цвета с различными оттенками. Для образцов, содержащих добавки Cr₂O₃, цвет образцов был палевым. Качество образцов, обожженных при всех температурных режимах обжига было удовлетворительным. Деформация, вспучивание и другие дефекты отсутствовали.

Общая линейная усадка образцов является важной характеристикой технологических свойств исследуемых масс и ее значения находились в сравнительно узком интервале — 4,3–6,2 %. Усадка образцов при введении электрокорунда снижалась при увеличении его количества и повышении температуры обжига и составляла 4,7–5,8 %. Более существенно снижали значения усадки добавки серпентинита и она находилась в интервале 4,9–6,2 %. Кремнеземное стекловолокно также влияет на величину линейной усадки и она составляет 4,6–5,6 %. Наименее заметное влияние на значения общей усадки оказывает Cr₂O₃, которая возрастает от 4,3 до 4,8 % с повышением его содержания от 0,5 до 3 %.

Кажущаяся плотность образцов исходного состава при повышении температуры обжига от 1100 до 1250 °С возрастала от 1447 до 1980 кг/м³. Введение электрокорунда увеличило этот показатель следующим образом: при добавке 5 % электрокорунда плотность образцов, обожженных при 1100 °С, составила 1450 кг/м³; при 1250 °С — 2067 кг/м³. При добавке 10 % электрокорунда эти значения возросли соответственно до 1455 и 2087 кг/м³.

Введение 5 и 10 % серпентинита повлияло на изменение плотности образцов следующим образом. При его добавке в количестве 5 % плотность образцов, обожженных при 1100 °С, составила 1508 кг/м³, и возросла при температуре обжига 1250 °С до 2086 кг/м³. При введении 10 % серпентинита эти значения составили соответственно 1604 и 2090 кг/м³.

Добавка Cr_2O_3 в количестве 1 и 3 % для образцов, обожженных при 1100 °С, повысила плотность незначительно и ее значения составили 1450 кг/м³, а обожженных при 1250 °С — до 1986 кг/м³.

Что касается кремнеземного волокна, введенного в количестве 3 %, то плотность образцов, обожженных при температуре 1100 °С составила 1489 кг/м³, возрастая до 1990 кг/м³ у образцов, термообработанных при 1250 °С.

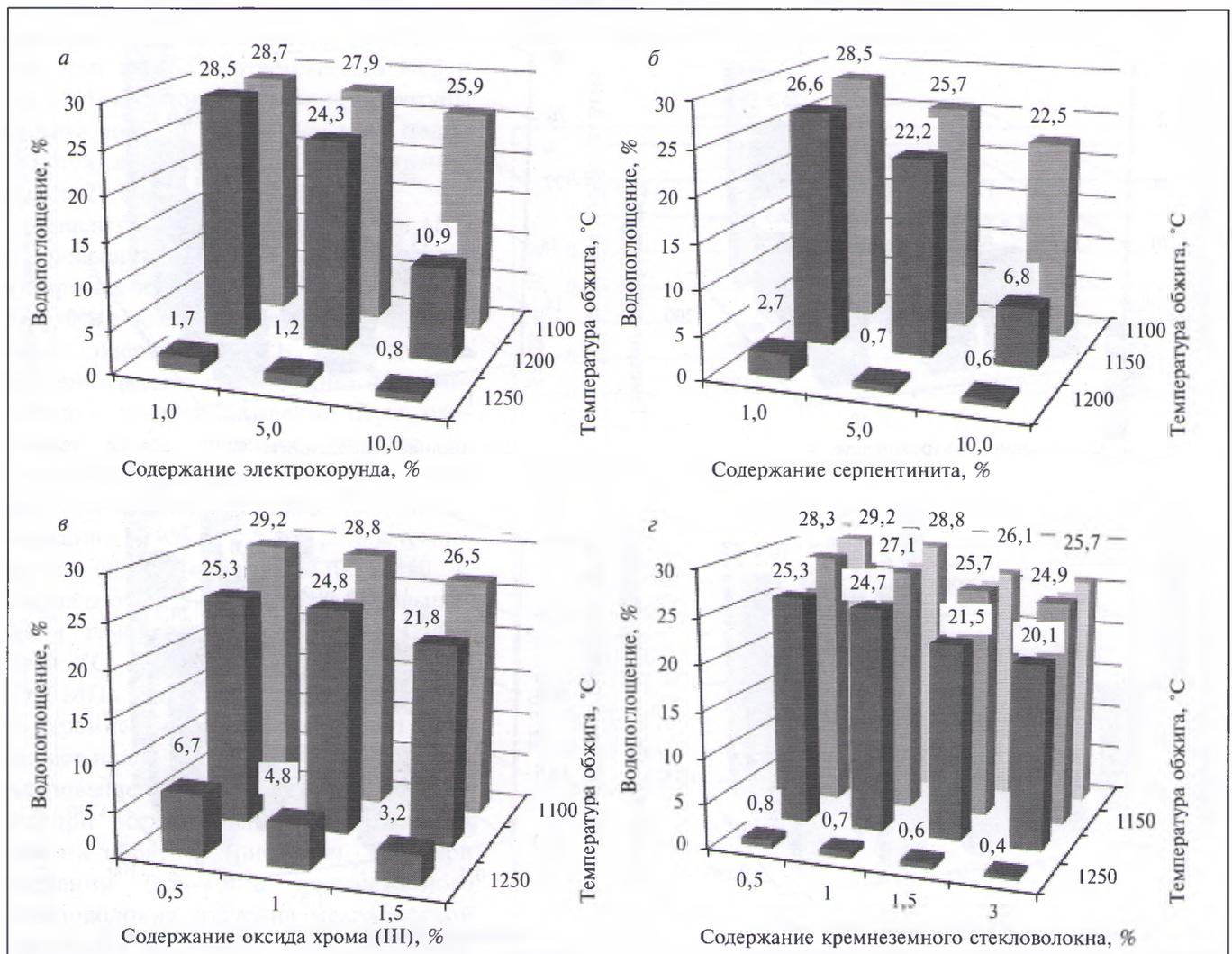
Таким образом, на значения кажущейся плотности наиболее весомое значение оказали добавки электрокорунда и серпентинита, вводимые в максимальных количествах (по 10 %).

Введение добавок-модификаторов существенным образом влияет на значения водопоглощения образцов. Так, добавка электрокорунда приводит к снижению водопоглощения в интерва-

ле температур 1100–1250 °С при его количестве 1–5 % в незначительной степени. Более заметным это снижение отмечается при содержании электрокорунда в количестве 10 %. Установлено, что во всем интервале содержания электрокорунда обжиг образцов при температуре 1200–1250 °С обеспечивает снижение значений водопоглощения. При температуре обжига 1250 °С образцы имеют наиболее низкое водопоглощение, находящееся в пределах от 1,7 до 0,8 % при содержании электрокорунда в количестве 1 и 10 % соответственно (рис. 1 а).

Введение серпентинита в базовый состав при количестве 1, 5 и 10 %, привело к незначительному снижению значений водопоглощения образцов, обожженных при температуре 1100 ± 5 °С. Подобное явление характерно и для температуры

Рис. 1. Зависимость водопоглощения образцов материалов от содержания электрокорунда (а), серпентинита (б), оксида хрома (III) (в), кремнеземного стекловолокна (г) и температуры обжига



обжига 1150 °С для масс, содержащих добавки серпентинита в количестве 1–5 %. При росте содержания серпентина до 10 % значения водопоглощения значительно снижаются — до 6,8 %. При температуре обжига 1250 °С отмечается снижение значений водопоглощения до 2,7–0,6 % при количестве добавок серпентина 1–10 % (рис. 1 б).

Добавка Cr_2O_3 в исходный состав массы в количестве 0,5–1,5 % оказывает незначительное снижение водопоглощения при температуре обжига 1100–1200 °С и составляет 29,2–21,8 %. Более значимое снижение водопоглощения отмечается при температуре 1250 °С, когда эти показатели достигают значений 6,7–3,2 % (рис. 1 в).

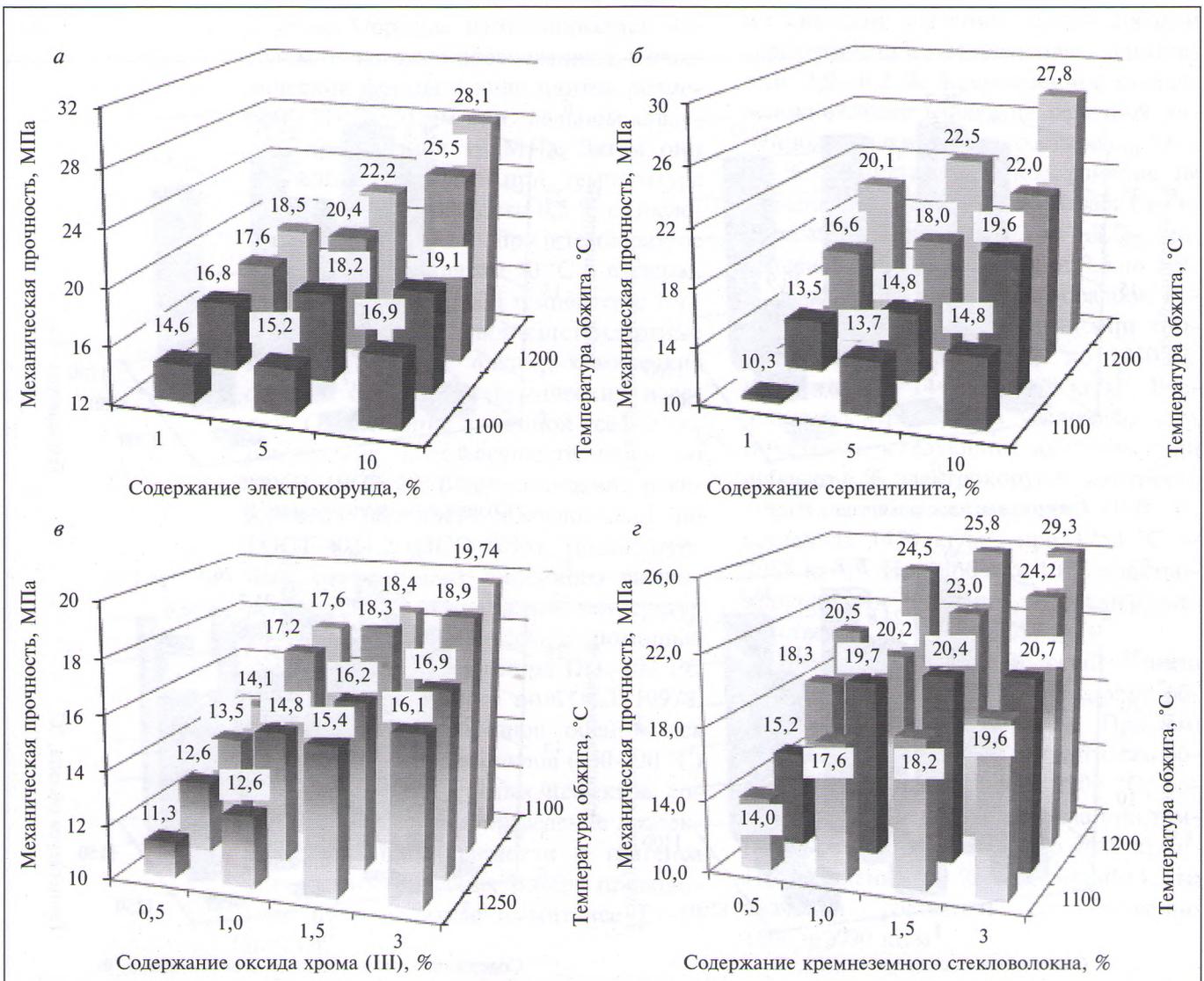
Кремнеземное стекловолокно, вводимое в состав исходной массы в коли-

честве 0,5–3 % при температуре обжига 1100–1200 °С также не оказывает существенного влияния на уменьшение значения водопоглощения образцов, которое составляет 29,2–25,7 % при температуре обжига 1100 °С. При повышении температуры обжига до 1200 °С эти значения снижаются до 25,3–20,1 %. Рост температуры обжига до 1250 °С приводит к резкому снижению водопоглощения, которое для всех составов находится в интервале 0,4–0,8 % (рис. 1 г).

Изменение значений механической прочности при изгибе образцов в зависимости от введенных добавок и температуры обжига представлено на рис. 2.

Механическая прочность при изгибе образцов композиционных материалов с введением электрокорунда повыша-

Рис. 2. Зависимость механической прочности при изгибе образцов от содержания электрокорунда (а), серпентинита (б), оксида хрома (III) (в), кремнеземного стекловолокна (г) и температуры обжига



ется как с количеством введенных добавок, так и с ростом температуры обжига. Эти значения при содержании 1–5 % электрокорунда составляют 14,6–15,2 МПа при температуре обжига образцов 1100 °С и возрастают до 18,5–22,2 МПа — при 1250 °С. Рост содержания электрокорунда до 10 % приводит к повышению показателей и они соответственно составляют 16,9 и 28,1 МПа (рис. 2 а).

Добавки серпентинита более существенно влияют на повышение механической прочности образцов, что может быть обусловлено значительным количеством формирующейся жидкой фазы, обогащенной магнийсодержащей составляющей. Следует отметить, что механическая прочность при изгибе особенно активно повышается с ростом температуры обжига до 1200–1250 °С. Так, образцы, содержащие серпентинит в количестве 1–10 % и обожженные при температуре 1100 ± 5 °С, характеризуются механической прочностью при изгибе соответственно 10,3 и 14,8 МПа. С повышением температуры обжига до 1250 °С эти значения повышаются и составляют соответственно 20,1 и 27,8 МПа (рис. 2 б).

Анализ влияния оксида хрома (III) на повышение механической прочности при изгибе образцов показывает, что она также возрастает как по мере увеличения содержания Cr₂O₃, так и при повышении температуры обжига. По сравнению с другими добавками Cr₂O₃ оказывает менее значимое влияние на показатели механической прочности при изгибе. Так, эти значения при содержании Cr₂O₃ от 0,5 до 1,5 % и температуре обжига образцов 1100–1150 °С составляют 11,3–16,2 МПа, с повышением температуры обжига до 1200–1250 °С они возрастают до 17,2–19,7 МПа (рис. 2 в).

Кремнеземное стекловолокно оказывает наиболее существенное влияние на повышение механической прочности при всех температурных режимах обжига образцов (рис. 2 г). Так, при введении 0,5–1,0 % кремнеземного стекловолокна значения механической прочности при изгибе образцов, обож-

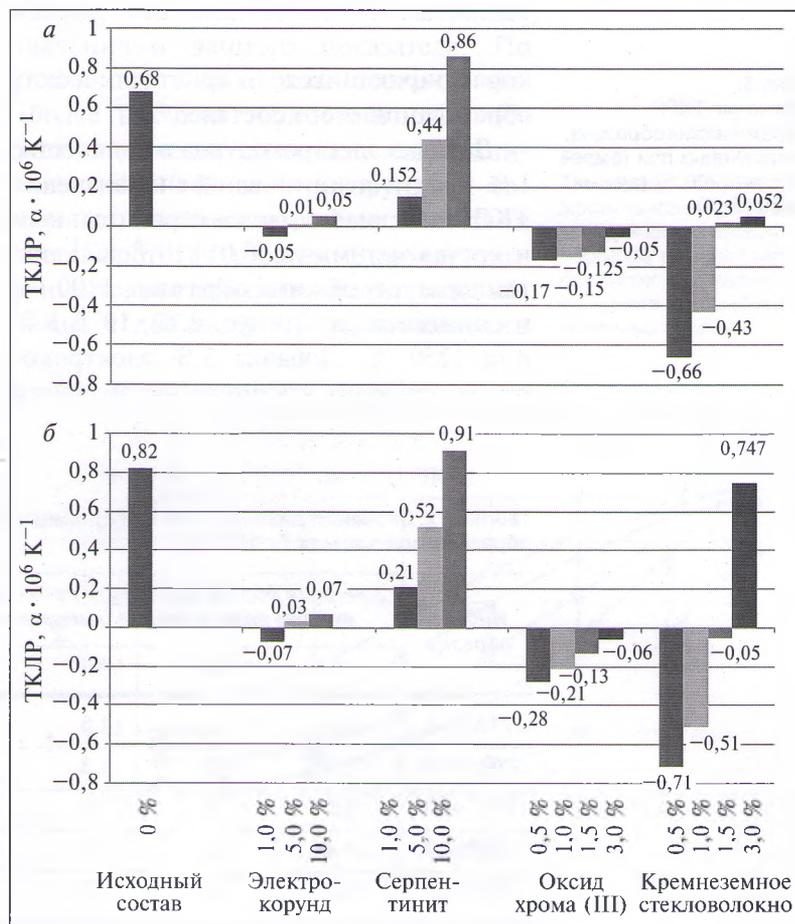
женных при 1100–1150 °С, находятся в интервале 14,0–20,7 МПа. Увеличение его количества в составе массы до 3 % приводит к росту показателей до 19,6–20,7 МПа. Повышение температуры обжига до 1250 °С обеспечивает эти значения соответственно 20,5–24,5 МПа и 29,3 МПа.

Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) является одной из важнейших характеристик керамических образцов литийалюмосиликатной керамики и его значения для исследованных масс находится на уровне, близком к нулевым.

ТКЛР исходной и модифицированных составов, обожженных при температурах 1100 и 1150 °С, приведены на рис. 3, а при 1200 и 1250 — на рис. 4.

Для исходного состава характерно снижение значений ТКЛР от плюс 0,68 · 10⁻⁶ К⁻¹ при температуре обжига 1100 °С до минус 0,04 · 10⁻⁶ К⁻¹ при температуре обжига 1250 °С. Это, очевидно, обусловлено возрастанием низ-

Рис. 3. Значения ТКЛР керамических образцов, обожженных при температуре 1100 °С (а); 1150 °С (б)



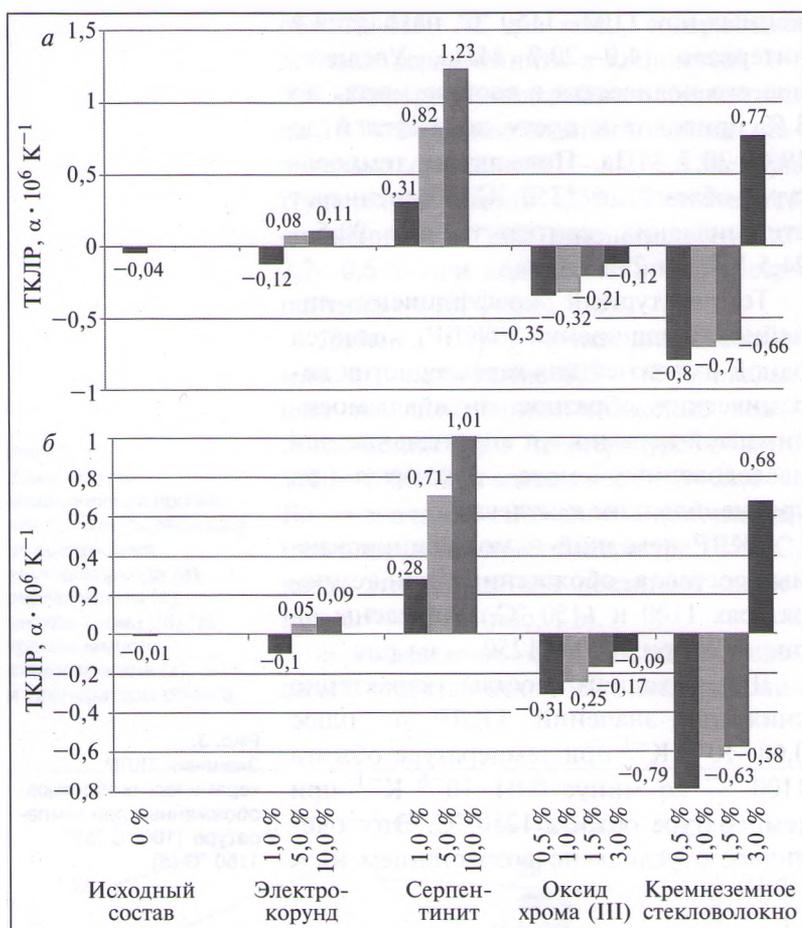


Рис. 4. Значения ТКЛР керамических образцов, обожженных при температуре 1200 °C (а); 1250 °C (б)

корасширяющихся кристаллических образований в его составе.

Добавка электрокорунда в количестве 1 % практически не влияет на значения ТКЛР, который остается отрицательным и составляет минус $0,05 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ при температуре обжига образцов 1100 °C и снижается до минус $0,12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ при 1250 °C. Добавка 5 % электрокорунда приводит к изменению значений

ТКЛР до положительных низких значений, составляющих $0,01 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и $0,08 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ при вышеуказанных режимах обжига. При введении 10,0 % электрокорунда сохраняются положительные низкие значения ТКЛР, лежащие в интервале $(0,05\text{—}0,11) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Несколько более значительно возрастают показатели ТКЛР при введении серпентинита. При этом все значения положительные и возрастают как при повышении количества введенной добавки, так и температуры обжига образцов. Так, значения ТКЛР при добавке 1 % серпентинита и температуре обжига образцов от 1100 до 1250 °C увеличивают ТКЛР от $0,152 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ до $0,31 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а при 10,0 % серпентинита в составе массы эти значения повышаются от $0,86 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ до $1,23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Добавка оксида хрома (III) весьма незначительно повышает значения ТКЛР, которые во всем интервале содержания Cr_2O_3 и температуры обжига остаются отрицательными. Так, при содержании 1 % оксида хрома (III) значения ТКЛР снизились от минус $0,15 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ до минус $0,32 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 1,5 % Cr_2O_3 — от минус $0,13 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ до минус $0,21 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и при 3 % Cr_2O_3 — от минус $0,05 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ до минус $0,09 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, то есть, снижение значений ТКЛР с повышением содержания оксида хрома (III) характерно и для других его количеств.

Что касается кремнеземного стекловолокна, то повышение его количества от 0,5 до 3 % приводит к росту значений

Таблица 2. Значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь образцов при частоте $f = 10^{10}$ Гц

Индекс образца	Значения диэлектрической проницаемости при температуре измерения, °C				Тангенс угла диэлектрических потерь при температуре измерения, °C	
	20	700	Δε	%	20	700
	21AK—5	6,1	7,4	1,3	21	0,012
21ЭК—10	6,7	8,0	1,3	19	0,015	0,070
21С—10	6,5	7,8	1,3	20	0,025	0,060
21КВ—3	6,4	7,5	1,1	17	0,019	0,057
21X—3	6,0	7,2	1,2	20	0,017	0,048

ТКЛР от минус $0,66 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ до плюс $0,052 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ при температуре обжига образцов $1100 \text{ }^\circ\text{C}$. Рост температуры их обжига приводит к незначительному снижению значений термического расширения при содержании добавки от 0,5 до 1 %. Следует отметить, что плюсовые значения ТКЛР, находящиеся в интервале от $0,023 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ до $0,77 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, характерны для образцов, содержащих 1,5–3 % кремнеземного стекловолокна и обожженных при $1250 \text{ }^\circ\text{C}$.

Исследование электрофизических свойств проводилось на образцах, содержащих максимальное количество вводимых добавок, в сравнении с исходным составом. Исследовались образцы, прошедшие обжиг при температуре $1250 \text{ }^\circ\text{C}$. Значения диэлектрической проницаемости (ϵ) и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) при частоте 10^{10} Гц и температуре измерения 20–700 $^\circ\text{C}$ для исследованных образцов приведены в табл. 2.

Температурная зависимость диэлектрической проницаемости образцов литийсодержащей керамики приведена на рис. 5, а тангенса угла диэлектрических потерь в интервале температур измерения 20–700 $^\circ\text{C}$ исходного состава и модифицированных образцов — на рис. 6.

Как видно из табл. 2 и рис. 6, значения тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) исходной массы при 20 $^\circ\text{C}$ составляют $12 \cdot 10^{-3}$ и возрастают при введении 10 % электрокорунда до $15 \cdot 10^{-3}$, серпентина (10 %) — $25 \cdot 10^{-3}$; кремнеземного волокна (3 %) — до $19 \cdot 10^{-3}$ и Cr_2O_3 (3 %) — до $17 \cdot 10^{-3}$. Повышение температуры исследования до 700 $^\circ\text{C}$ приводит к повышению $\text{tg}\delta$ до следующих значений: исходного состава — $62 \cdot 10^{-3}$, при добавке 10 % электрокорунда — $70 \cdot 10^{-3}$; 3 % кремнеземного волокна — $60 \cdot 10^{-3}$, серпентина в количестве 10 % — $57 \cdot 10^{-3}$ и 3 % Cr_2O_3 — $48 \cdot 10^{-3}$.

Температурная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь образцов, модифицированных добавками 3 % Cr_2O_3 , характеризуется слабо выраженным минимумом в интервале температур 100–400 $^\circ\text{C}$, что может

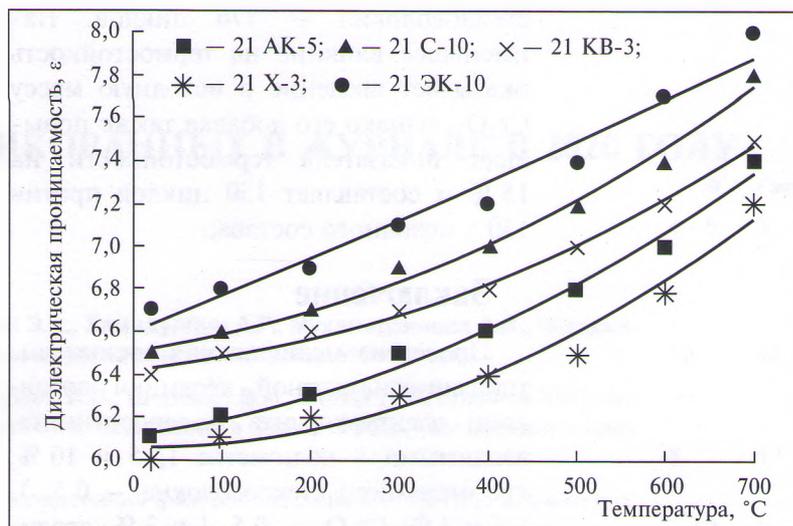


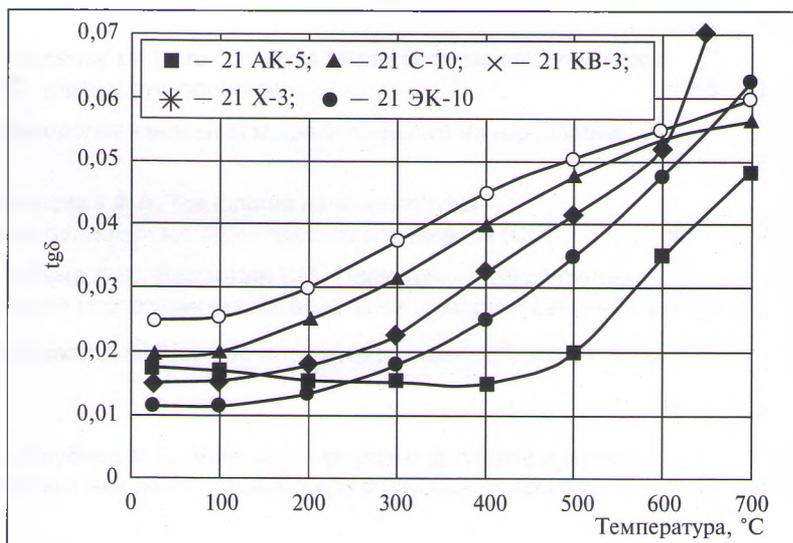
Рис. 5. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости образцов литийалюмосиликатной керамики

обуславливаться особенностями структуры данного образца.

Диэлектрические потери исследованных образцов находятся в соответствии с химическим составом, степенью их кристаллизации и наличием стекловидной фазы, на что указывалось в других работах [7, 8].

Исследования термостойкости образцов синтезированной керамики показали, что они обладают высокими значениями данного показателя. По сравнению с исходным составом наиболее высокой термостойкостью обладают образцы керамики, модифицированной 10 % электрокорунда и таким же количеством серпентинита и составляют 180 циклов. Высокие значения термостойкости имеют также образцы с добавкой 3 % кремнеземного

Рис. 6. Температурная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь образцов литийалюмосиликатной керамики исходного и модифицированных составов



стекловолокна — 176 циклов. Наименьшее влияние на термостойкость оказывает введение в исходную массу Cr_2O_3 , однако его добавка также повышает показатель термостойкости на 15 % и составляет 150 циклов против 130 у исходного состава.

Заключение

Проведена модификация состава литийалюмосиликатной керамики добавками электрокорунда и серпентинита, вводимыми в количестве 1, 5 и 10 %; кремнеземного стекловолокна — 0,5, 1, 1,5 и 3 %; Cr_2O_3 — 0,5, 1 и 3 %, вводимых сверх 100 % составляющих исходной массы.

На основании проведенных комплексных исследований установлена эффективность применения добавок, активирующих спекание литийалюмосиликатной керамики, при котором достигается высокий уровень физико-химических свойств. Обеспечено снижение водопоглощения образцов и ТКЛР до значений, близких к нулевым; повышение термостойкости; требуемые и электрофизические свойства для образцов, которые получены из пресс-порошка при шликерной подготовке масс полусухим прессованием и обжигом в интервале температур 1100—1250 °С с выдержкой 1 ч.

Проведенные исследования позволяют провести выбор модифицирующей добавки из числа исследованных и ее количество в соответствии с требу-

мым комплексом свойств разрабатываемых термостойких материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кичкайло О.В., Левицкий И.А.* Получение термостойких керамических материалов в системе $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ // Огнеупоры и техническая керамика. — 2013. — № 11–12. С. 50–60.
2. *Кичкайло О.В., Левицкий И.А.* Интенсификация спекания термостойкой керамики на основе системы $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ // Огнеупоры и техническая керамика. — 2015. — № 10. — С. 3–13.
3. *Суздальцев Е.И., Харитонов Д.В.* Интенсификация процесса спекания литийалюмосиликатной стеклокерамики // Новые огнеупоры. — 2003. — № 7. — С. 42–44.
4. *Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Балинова Ю.А.* Перспективные армирующие высокотемпературные волокна для металлических и керамических композиционных материалов // Труды ВИАМ. 2013, № 2. — С. 3–5.
5. *Суздальцев Е.И.* Радиопрозрачные высокотермостойкие материалы XXIII века // Новые огнеупоры. — 2002. — № 3. — С. 42–50.
6. *Шамшетдинов К.Б., Чевыкалова Л.А., Алексеев Д.В., Келина И.Ю., Бородай Ф.Я., Рудыкина В.Н.* Теплозащитное покрытие: пат. RU 2497783 С2, № 2497783; заявл. 17.02.2012; опублик. 10.11.2013. 6 с.
7. *Хамицаев А.С.* Теплофизические характеристики и зависимость свойств конструкционной керамики от температуры // Авиационно-космическая техника и технология. — 2004. — № 5. — С. 42–53.
8. *Суздальцев Е.И.* Керамические материалы: вчера, сегодня, завтра // Новые огнеупоры. — 2014. — № 10. — С. 5–18.