

УДК 666.3-13

## ВЗАИМОСВЯЗЬ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЛИТИЙАЛЮМОСИЛИКАТНОЙ КЕРАМИКИ

© Д-р техн. наук И.А. Левицкий, А.И. Тригубович

Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь

Целью исследований является определение взаимосвязи структуры и фазового состава литийалюмосиликатной керамики, модифицированной добавками электрокорунда, серпентинита, кремнеземного стекловолокна и оксида хрома (III). Установлено влияние добавок на процессы, протекающие в керамических массах при нагревании, изменение их фазового состава и структуры во взаимосвязи с температурой обжига образцов.

**Ключевые слова:** литийалюмосиликатная керамика, фазообразование, структура, фазовые превращения,  $\beta$ -эвкрипит,  $\beta$ -сподумен, муллит, псевдоволластонит, пористость.

The aim of the research is to determine the relationship between structure and the phase composition of lithium-aluminosilicate ceramics modified with additives of electrocorundum, serpentinite, silica glass fiber and chromium oxide (III). The effects of additives upon the processes occurring in ceramic masses during heating, changes in their phase composition and structure in relation to the sintering temperature were established.

**Keywords:** lithium-aluminum silicate ceramics, phase formation, structure, phase transformations,  $\beta$ -eucryptite,  $\beta$ -spodumene, mullite, pseudovollastonite, porosity.



Левицкий И.А.

### Введение

Проведенные нами исследования по модификации керамики на основе оксидной системы  $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  электрокорундом, серпентинитом, кремнеземным волокном и оксидом хрома (III) [1] позволили установить эффективность их применения в качестве добавок, активизирующих процессы спекания керамики. При этом достигается высокий уровень физико-химических свойств: снижение водопоглощения и температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) до значений, близких к нулевым; повышении термостойкости; обеспечение требуемых электрофизических свойств. Это достигается при полусухом методе изготовления образцов в широком температурном интервале обжига — 1100—1250 °С. Проведенные исследования зависимости физико-химических свойств от состава масс позволяют провести выбор модифицирующей добавки из числа исследованных и их количества в соответ-

ствии с требуемым комплексом свойств термостойких изделий.

Задачей данных исследований являлось изучение взаимосвязи свойств полученных изделий с формированием фазового состава и структуры образцов в зависимости от вводимых модификаторов, их количества и температурных режимов обжига керамических изделий.

### Методика эксперимента и исходные материалы

В качестве исходных составов были использованы образцы, для которых изучались физико-химические свойства, полученные полусухим методом прессования из порошков, путем обезвоживания приготовленного тонким помолом шликера, с последующим обжигом в интервале температур 1100—1250 °С и выдержкой 1 ч.

Термический анализ керамических масс осуществлялся на дифференциально-сканирующем калориметре DSC 404 F3 Pegasus фирмы NETZSH (Германия)

в интервале температур 30–1250 °С в среде аргона с точностью ±1,5 °С.

Исследование фазового состава проводилось на дифрактометре D8 ADVANCE Bruker (Германия) с использованием CuK $\alpha$ -излучения при комнатной температуре в диапазоне углов 20–80°. Расшифровка дифрактограмм и идентификация кристаллических фаз велась с помощью программного обеспечения Diffrac Plus фирмы Bruker и картотеки Joint Commitecon Fowler Diffraction Standarts.

Структура образцов изучалась с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM JEOL 5610 (Япония) на их сколе.

### Экспериментальная часть

С целью установления процессов, происходящих в керамических массах исходного и модифицированных составов, исследовалось их поведение при нагревании с помощью метода дифференциально-сканирующей калориметрии.

Кривая ДСК керамической массы исходного состава 21AK-5 (рис. 1) в сравнении с образцом, полученным методом шликерного литья [2], имеет близкий характер. Так, эндотермический эффект при сравнительно низкой

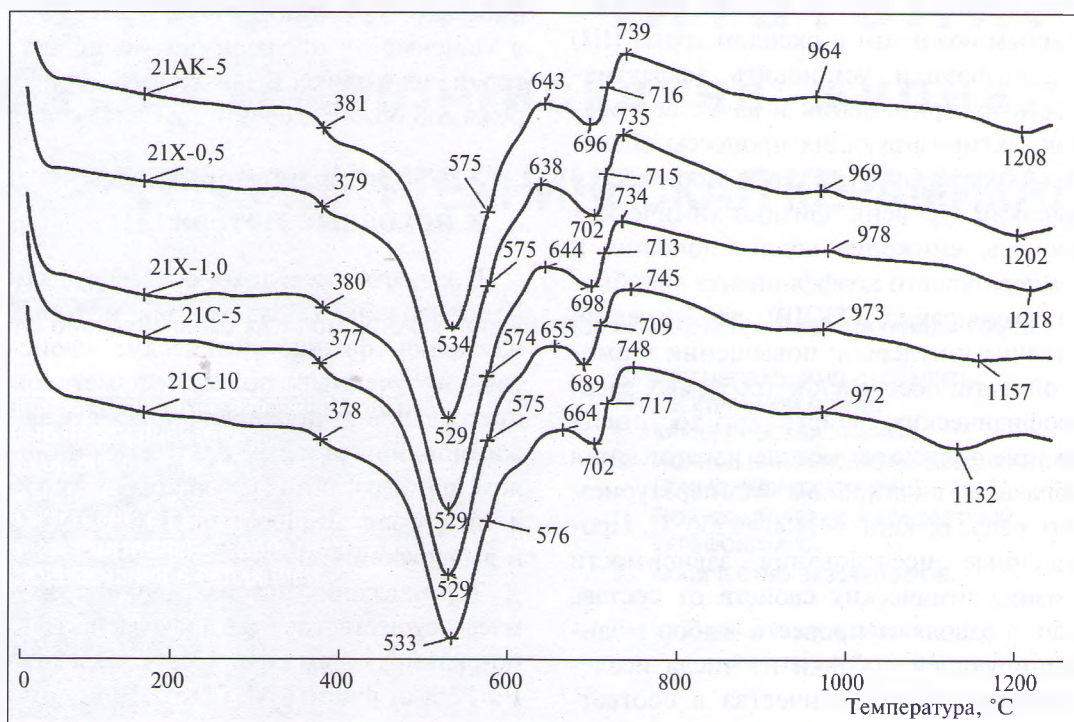
температуре 68 и 62 °С соответственно, для исследованных масс связан с удалением сорбированной воды из глинистых материалов керамических масс (глины огнеупорной и каолина). Эндотермические эффекты при 412 и 381 °С, соответственно, обусловлены выделением конституционной воды и частичной перестройкой структуры монтмориллонита.

Глубокий эндотермический эффект соответственно при 533 и 534 °С обусловлен выделением воды, связанный с гидроксильными группами и аморфизацией каолинита. Значительная площадь экзотермических эффектов и их глубина свидетельствует о довольно интенсивном протекании указанных процессов.

Эндотермические двухступенчатые эффекты при 599 и 595 °С, а также при 696 и 716 °С соответственно обусловлены, по нашему мнению, плавлением входящего в состав масс карбоната лития с последующим его разложением.

Литературные данные о поведении входящего в состав массы углекислого лития при нагревании противоречивы. Авторы [3] считают, что химически чистый Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> плавится при температуре 720 °С, обуславливая эндоэффект на термограмме. Другие исследователи

**Рис. 1.** Кривые ДСК шихт литийалюмосиликатной керамики состава 21AK-5, модифицированной добавками: 0,5 и 1 % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (составы 21X-0,5 и 21X-1,0); 5 и 10 % серпентина (составы 21C-5 и 21C-10)



[4] полагают, что вблизи температуры плавления (или одновременно с ней) он начинает диссоциировать, образуя оксид лития, который в расплаве весьма агрессивен. При этом указывается, что наиболее надежная температура плавления  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  составляет  $732\text{ }^\circ\text{C}$  [4].

Нашими исследованиями используемого углекислого лития марки ЛУ-1 установлено, что при температуре  $606\text{ }^\circ\text{C}$  отмечается небольшой эндотермический эффект, связанный с разложением присутствующих в нем примесей  $\text{LiCl}$  [5]. Глубокий эндотермический эффект при  $740\text{ }^\circ\text{C}$  вызван плавлением  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  с последующим его разложением. При температуре  $818\text{ }^\circ\text{C}$  отмечается неглубокий экзотермический эффект, который связан с образованием легкоплавкой эвтектики между карбонатом и образовавшимся при разложении оксидом лития.

Экзотермические эффекты на кривой ДСК исходной массы при  $963$  и  $964\text{ }^\circ\text{C}$  связаны с процессами формирования литийсодержащих кристаллических фаз, а при  $1207$  и  $1208\text{ }^\circ\text{C}$  вызваны плавлением составляющих компонентов керамических масс.

При введении в рецептуру исходного состава  $0,5$  и  $1\%$   $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (составы 21X-0,5 и 21X-1,0; рис. 1) эндоэффекты, связанные с выделением сорбированной влаги из массы не изменяются, а удаление воды из гидроксильных групп каолинита сдвигаются в сторону меньших температур и составляют  $529\text{ }^\circ\text{C}$  вместо  $534\text{ }^\circ\text{C}$  у исходного состава. Несколько изменяются эндоэффекты, обусловленные плавлением карбоната лития и его разложением, и составляют  $702$  и  $698\text{ }^\circ\text{C}$  и  $715$  и  $713\text{ }^\circ\text{C}$  против  $696\text{ }^\circ\text{C}$  и  $716\text{ }^\circ\text{C}$  у исходного состава соответственно.

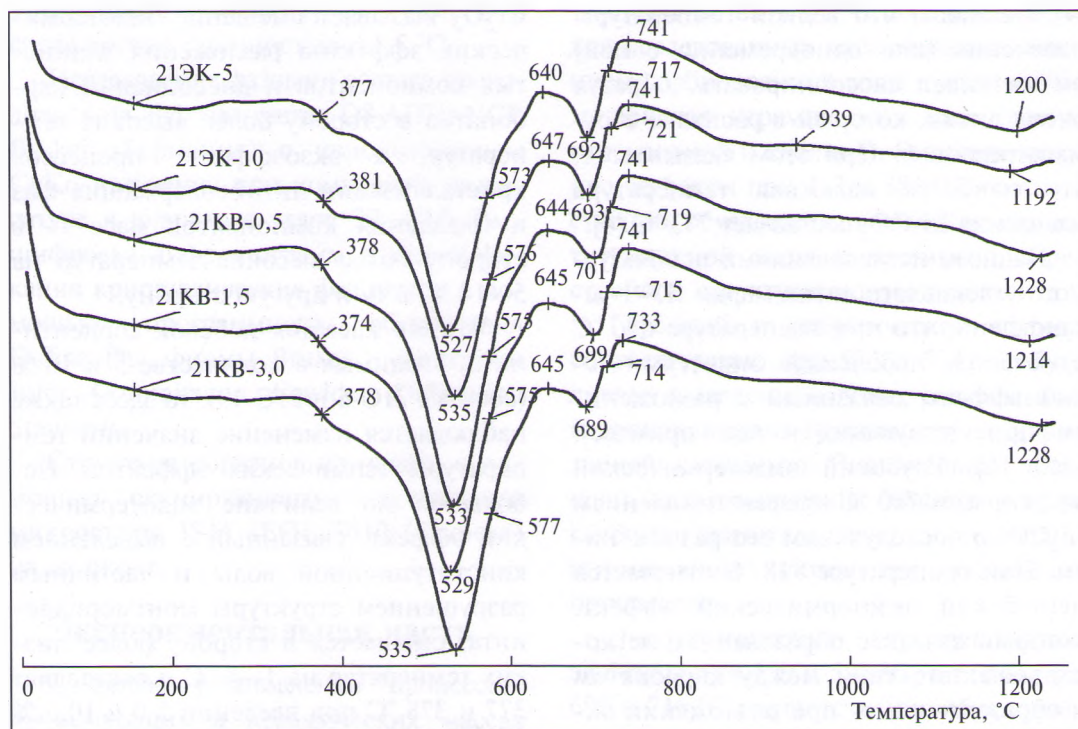
Повышение содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  до  $1\%$  вызывает также смещение эндоэффекта кристаллизации новообразований в составе исследованных масс до  $969$  и  $978\text{ }^\circ\text{C}$  против  $964\text{ }^\circ\text{C}$  у исходной массы. Температура плавления составляющих масс также повышается до  $1202$  и  $1218\text{ }^\circ\text{C}$  против  $1208\text{ }^\circ\text{C}$  у исходной массы соответственно. Таким образом, добавка небольших количеств

$\text{Cr}_2\text{O}_3$  вызывает смещение эндотермических эффектов разложения глинистых компонентов и диссоциации карбонатов в сторону более высоких температур, а экзоэффекта процессов кристаллизации литийсодержащих фаз и плавления компонентов масс — в сторону более высоких температур на  $5\text{--}14\text{ }^\circ\text{C}$  в ту и другую сторону.

Что же касается добавок серпентинита, вводимых в количестве  $5$  и  $10\%$  (составы 21С-5 и 21С-10), то здесь также наблюдается изменение значений температуры термических эффектов. Небольшой по величине эндотермический эффект, связанный с выделением конституционной воды и частичным разрушением структуры монтмориллонита, смещается в сторону более низких температур на  $1\text{--}4\text{ }^\circ\text{C}$  и составляет  $377$  и  $378\text{ }^\circ\text{C}$  при введении  $5,0$  и  $10,0\%$  серпентинита соответственно, против  $381\text{ }^\circ\text{C}$  у исходной массы. Практически не изменяются температурные значения двухступенчатых эндоэффектов, наблюдаемых при  $529\text{--}533\text{ }^\circ\text{C}$  и  $575\text{--}576\text{ }^\circ\text{C}$ , обусловленных выделением воды из гидроксильных групп каолинита. Возрастает температурный максимум эндотермического эффекта плавления и разложения карбоната лития от  $696$  и  $716\text{ }^\circ\text{C}$  у исходной массы до  $689$  и  $702\text{ }^\circ\text{C}$ , а также до  $709$  и  $717\text{ }^\circ\text{C}$  при введении  $5$  и  $10\%$  серпентинита соответственно. Температура процесса кристаллизации литийсодержащих фаз также возрастает от  $964\text{ }^\circ\text{C}$  у исходной массы до  $973$  и  $972\text{ }^\circ\text{C}$  соответственно указанному выше количеству добавок серпентинита. Процесс плавления составляющих массы при введении  $5$  и  $10\%$  серпентинита существенно снижается и составляет  $1157$  и  $1132\text{ }^\circ\text{C}$  соответственно против  $1208\text{ }^\circ\text{C}$  у исходного состава. Это позволяет сделать вывод, что введение серпентинита обеспечивает флюсующее действие в составах исследованной литийсодержащей керамики.

При введении электрокорунда в количестве  $5$  и  $10\%$  (составы 21ЭК-5 и 21ЭК-10; рис. 2) эндоэффекты, связанные с дегидратацией глинистых материалов практически не изменяются. Так, потеря гидратной влаги монтморилло-

**Рис. 2.**  
Кривые ДСК шихт литийалюмосиликатной керамики 21АК-5, модифицированной добавками: 5 и 10 % электрокорунда (составы 21 ЭК-5 и 21 ЭК-10) и 0,5; 1,5 и 3 % кремнеземного стекловолокна (составы 21 КВ-0,5; 21 КВ-1,5 и 21 КВ-3)



нитом с частичной аморфизацией вещества отмечается при 377 и 381 °С соответственно (у исходного состава — 381 °С). Потеря химически связанной воды каолинитом фиксируется двойными эндоэффектами, значения которых составляют: первый — 527 и 535 °С; второй — 573 и 576 °С. Плавление карбоната лития наблюдается при 692 и 693 °С (696 °С — для исходной массы), а разложение — при 717 и 721 °С против 716 °С у исходного состава. Характерные для выше рассмотренных масс процессы кристаллизации для составов, содержащих электрокорунд, не фиксируются. Что же касается плавления составляющих этих масс, то он смещается в сторону более низких температур и составляет 1200 и 1192 °С соответственно при добавке 5 и 10 % электрокорунда (составы 21 ЭК-5 и 21 ЭК-10, рис. 2) против 1208 °С у исходной массы.

Введение кремнеземного волокна в состав литийалюмосиликатных керамических масс также изменяет характер тепловых эффектов. Потеря химически связанной воды монтмориллонитовой составляющей у этих масс происходит соответственно количеству введенного кремнеземного стекловолокна (составы 21КВ-0,5; 21КВ-1,5 и 21КВ-3; рис. 2) и

составляет 378, 374 и 378 °С соответственно, против 381 °С у исходной массы. Глубокие двойные эндоэффекты дегидратации каолинита отмечаются у исследованных масс при следующих значениях соответственно: 533 и 575 °С; 529 и 575 °С, а также 535 и 577 °С при введении 0,5 %, 1 и 3 % стекловолокна. Для исходного состава эти температуры составляют 534 и 575 °С. Декарбонизация  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  приходится соответственно на 701, 699 и 689 °С (у исходной массы — 696 °С), т.е. температуры эндоэффектов несколько снижаются. Неглубокий эндоэффект при 719, 715 и 714 °С для масс, содержащих указанные выше количества добавок кремнеземного волокна соответственно, против 716 °С у исходной массы, также показывает снижение данной температуры, обусловленной дегидратацией карбоната лития. Для образцов, содержащих кремнеземное стекловолокно, экзотермический эффект кристаллизации не регистрируются. Что же касается плавления компонентов исследованных масс, то этот эндоэффект составляет 1228 °С (содержание 0,5 % стекловолокна), 1214 °С (1 % стекловолокна) и 1228 °С (3 % стекловолокна) против 1208 °С у исходной массы. Это свидетельствует о

повышении температуры плавления шихт с введением кремнеземного стекловолокна, имеющего более высокую температуру формирования расплава.

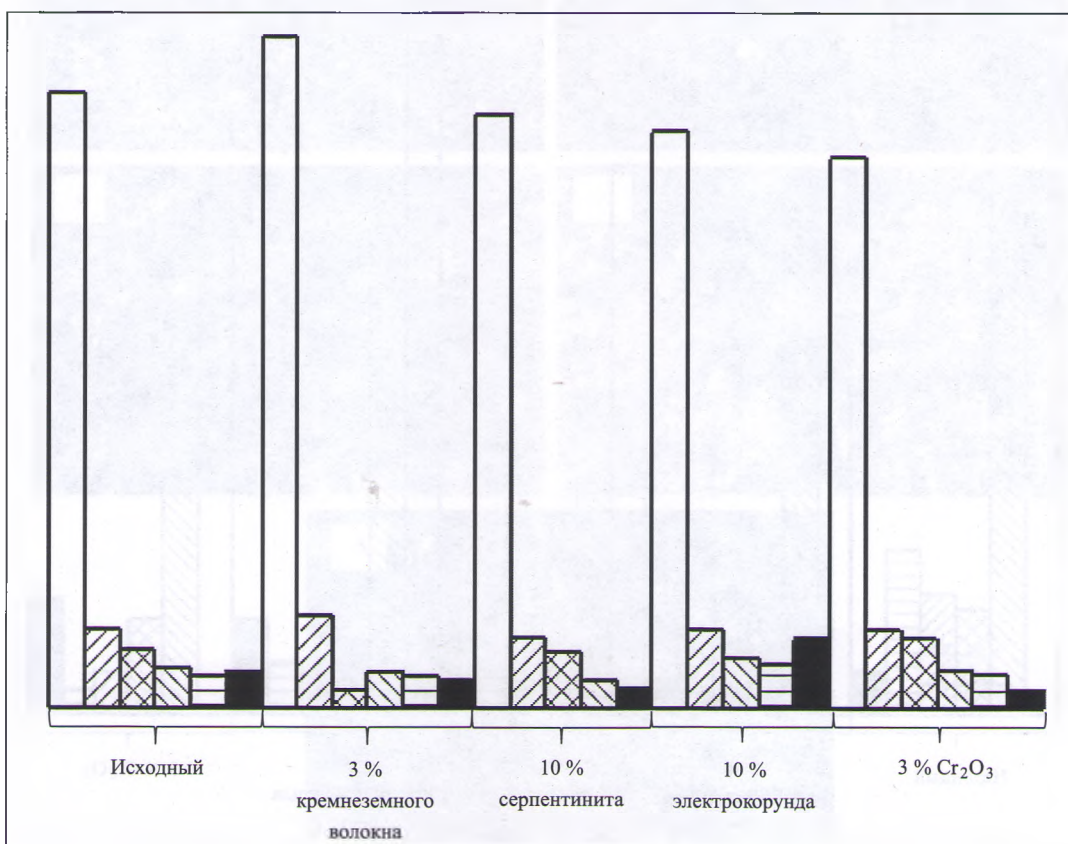
Данными исследованиями установлено существенное изменение фазового состава и структуры модифицированных образцов по сравнению с исходным составом.

Ранее определено [5, 6], что в исследуемой системе показатели свойств определяются формированием литийсодержащих фаз β-эвкриптита и β-сподумена. Положительную роль в структуре играет также муллит, имеющий игольчатую форму кристаллов, обеспечивающий повышение физико-химических характеристик исследуемого материала. Упрочняет структуру образцов присутствие корунда и псевдоволластонита. Еще одной кристаллической фазой, наличие которой установлено в исходном образце, является α-кварц. Его наличие имеет отрицательную роль, так как повышаются значения ТКЛР, снижается термостойкость и изменяются электротехнические свойства образцов.

Гистограммы, масштабно отражающие относительную интенсивность дифракционных максимумов (100 %) образующихся кристаллических фаз при температуре обжига образцов 1100 °С и оптимальном количестве введенных добавок-модификаторов, представлены на рис. 3.

Выявлено, что наиболее эффективной модифицирующей добавкой является кремнеземное стекловолокно. Его введение в количестве 0,5 и 1 % практически не влияет на изменение фазового состава. Повышение содержания кремнеземного стекловолокна до 1,5 и 3 % приводит к росту содержания литийсодержащей фазы β-сподумена. При этом остается практически неизменным количество β-эвкриптита. Почти в 3 раза снижается количество образующегося α-кварца. Количество муллита и псевдоволластонита сохраняется практически неизменным. Незначительно снижается содержание корунда.

Это изменение структуры находится в соответствии с полученными данными по показателям температурного ко-



**Рис. 3.** Интенсивность дифракционных максимумов (100 %) образующихся кристаллических фаз в литийалюмосиликатной матрице, армированной добавками, обожженными при температуре 1100 °С:  
 □ — β-сподумен (0,349 нм);  
 ▨ — α-кварц (0,343 нм);  
 ▩ — псевдоволластонит (0,320 нм);  
 ▧ — β-эвкриптит (0,353 нм);  
 ▦ — муллит (0,339 нм);  
 ■ — α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,2085 нм)

эфициента линейного расширения, механической прочности при изгибе, электрофизических свойств образцов [1].

Серпентинит, количество которого в качестве добавки составляет 5 и 10 %, несколько снижает по сравнению с исходным образцом содержание  $\beta$ -сподумена и  $\beta$ -эвкрипитита, при этом относительное количество  $\alpha$ -кварца остается на уровне исходного состава. Несколько уменьшалось относительное содержание муллита и корунда. Не обнаружено присутствие псевдволастонита. Оптимальное количество серпентина составило 10 %.

Это же количество электрокорунда также несколько снижает содержание литийсодержащих фаз  $\beta$ -сподумена и  $\beta$ -эвкрипитита. На уровне исходного образца сохраняется относительное количество кварца и псевдволастонита. Возрастает в 1,5 раза содержание  $\alpha$ -корунда, что вполне закономерно.

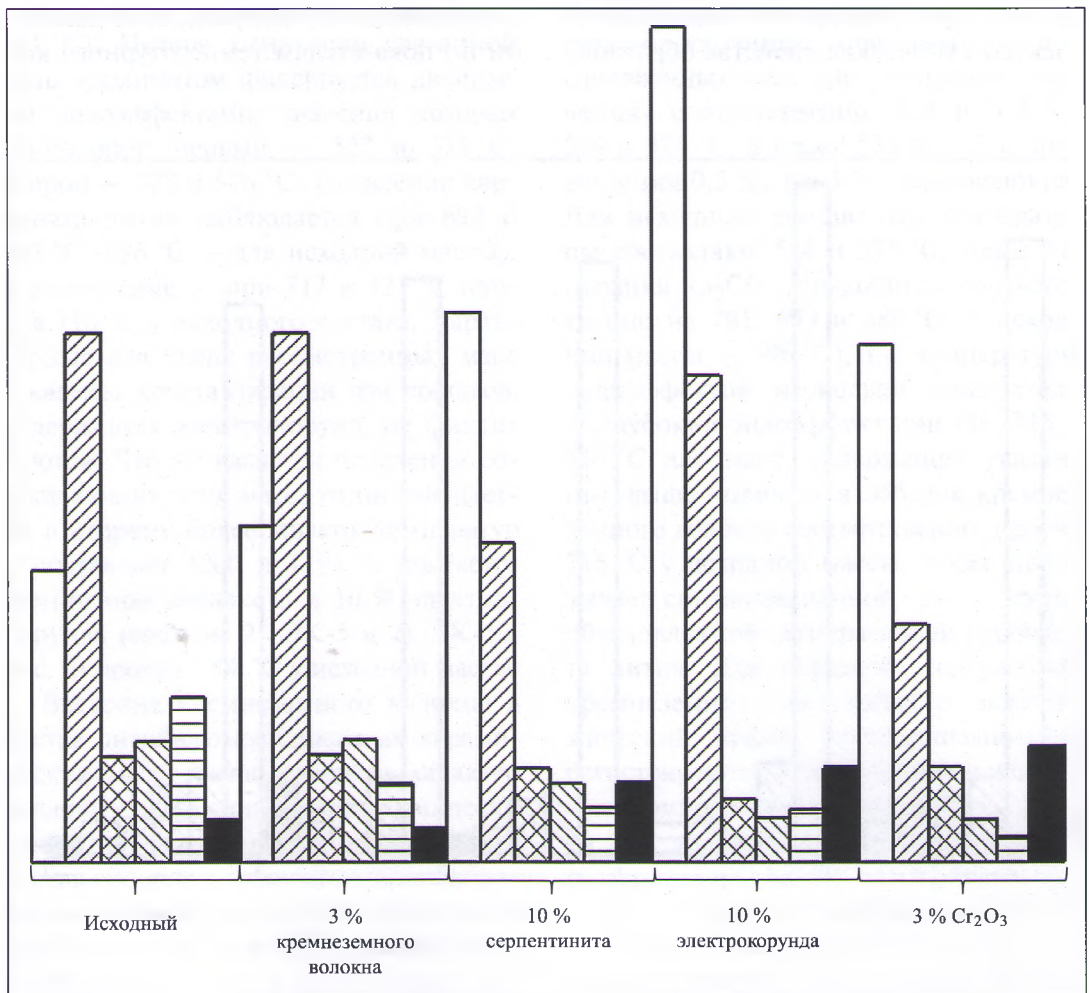
При введении  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в количестве 3 % еще заметнее снижается относи-

тельное количество  $\beta$ -сподумена. Относительное количество кристаллических фаз  $\beta$ -эвкрипитита, муллита, псевдволастонита сохраняется на уровне исходного состава. Примерно вдвое сократилось содержание корунда.

Исследования фазового состава образцов, обожженных при 1100 °С, позволили установить, что введение модифицирующих добавок приводит к изменению преимущественно количественного содержания кристаллических фаз, среди которых преобладающее содержание принадлежит литийсодержащей фазе —  $\beta$ -сподумену.

Представленная зависимость (рис. 4) интенсивностей фаз, сформированных при температуре обжига 1200 °С, свидетельствует о ином влиянии исследованных добавок на рост их количества. Так, суммарное количественное содержание литийсодержащих фаз  $\beta$ -сподумена и  $\beta$ -эвкрипитита при всех вводимых добавках возрастает. Особенно сущест-

**Рис. 4.** Интенсивность дифракционных максимумов образующихся кристаллических фаз в литийалюмосиликатной матрице, армированной добавками (температура обжига 1200 °С):  $\beta$ -сподумен — 0,393 нм;  $\beta$ -эвкрипитит — 0,353 нм;  $\alpha$ -кварц — 0,340 нм; муллит — 0,339 нм; псевдволастонит — 0,339 нм;  $\alpha$ -корунд — 0,285 нм. Обозначения соответствуют рис. 3



венно это повышение при введении 10 % электрокорунда, менее заметно возрастает количество литийсодержащих фаз при введении 3 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

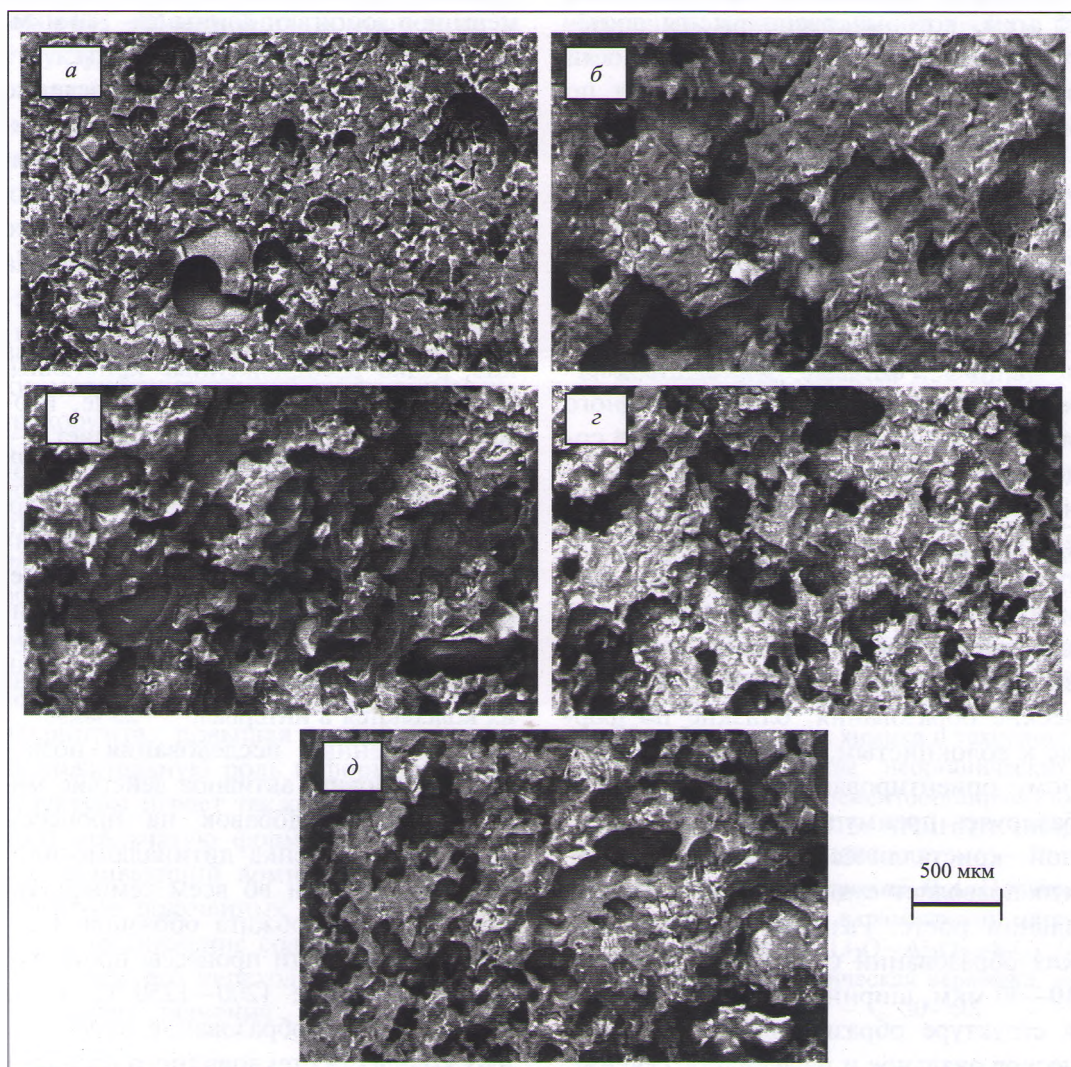
Количество кварца, негативно влияющего на свойства литийсодержащей керамики, наиболее существенно снижается при введении электрокорунда и  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Его количество при раздельном введении добавок 3 % кремнеземного волокна, 10 % серпентина и 3 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  сохраняется на уровне исходного состава.

Количество муллита в образцах исходного состава и при добавлении 3 % кремнеземного волокна находится примерно на одном уровне. В образцах с добавками, по сравнению с исходным составом, количественное содержание этой фазы снижается в ряду серпентин → электрокорунд →  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Причем содержание муллита в образцах с добавкой  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  уменьшается примерно в 15 раз.

Что касается корунда, то его количество в исходном и модифицированном составе, содержанием 3 % кремнеземного стекловолокна, примерно одинаковы, и возрастает в ряду серпентин → электрокорунд →  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . При добавлении 3 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  интенсивность фазы корунда возрастает примерно втрое по сравнению с исходным составом.

Содержание фазы псевдоволластона наиболее значимо в исходном составе и оно постепенно снижается в ряду вводимых добавок кремнеземное волокно → серпентин → электрокорунд → оксид хрома (III).

Таким образом следует отметить, что важная роль в процессе формирования фазового состава принадлежит температурному режиму обжига: рост температуры обжига существенно изменяет относительное количество литийсодержащих фаз и их соотношение.



**Рис. 5.** Электронно-микроскопические снимки структуры исходной литийалюмосиликатной керамики (а) и модифицированной добавками: 10 % серпентинита (б); 3 % стекловолокна (в); 10 % электрокорунда (г) и 3 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (д)

Электронно-микроскопические снимки скола образцов представлены на рис. 5.

Структура образца исходного состава 21АК—5, обожженного при 1200 °С, характеризуется плотной кристаллической структурой с отсутствием четких элементов ограничения кристаллов, со значительным содержанием стекловидной фазы, которая обуславливает их оплавление. Наблюдается наличие извилистых пор. Преобладают поры щелевидные, ориентированные вдоль границ кристаллических образований. Размер их по длине составляет от 50 до 500 мкм, ширина находится в интервале 10—40 мкм (рис. 5 а).

Введение в исходный состав серпентинита (рис. 5 б) приводит к уплотнению структуры керамического изделия с формированием преимущественно мелких кристаллических образований, близких по огранке к волокнистым, с размером по длине не превышающим 15 мкм, которые расположены достаточно равномерно по всей поверхности образца. Их количество возрастает по мере роста введенного серпентинита. Наблюдается формирование закрытых округлых пор преимущественно овального сечения диаметром от 10 до 200 мкм, которые расположены бессистемно на исследуемом сколе образца.

Введение кремнеземного стекловолокна (рис. 5 в) также приводит к заметному изменению структуры исходного материала. По мере увеличения его содержания также происходит уменьшение размеров кристаллов по сравнению с исходным составом. При этом структура керамики остается плотной, цементированной, с оплавлением граней кристаллов. В формирующейся стекловидной фазе присутствуют кристаллические образования, близкие по форме к волокнистым. Они имеют по-разному ориентированное расположение, базируясь преимущественно на основной кристаллической составляющей, что позволяет судить об их эпитексиальном росте. Размеры кристаллических образований составляют по длине 10—30 мкм, ширине — 5—7 мкм. Поры в структуре образца имеют специфическое овальное и щелевидное сечение,

чаще всего бессистемное расположение. Размер пор достигает до 400 мкм по длине, по ширине — 200 мкм. Преобладают поры размером 50—100 мкм по длине с их шириной 20—30 мкм. Они расположены преимущественно вдоль нечетко оформленных, корродированных граней кристаллов.

Добавки электрокорунда (рис. 5 г) в количестве 10 % также существенно изменяют структуру обожженных образцов. Она остается весьма плотной, значительно укрупняются образования в виде кристаллических сростков, характеризующихся оплавленными гранями. На их фоне заметны мелкие кристаллы, которые равномерно расположены на фоне крупнокристаллических образований. Их огранка близка к изометрической и шаровидной, размеры составляют менее 10 мкм. Поры здесь крупных размеров с расширениями и пережимами, сечение их округлое. Размеры пор достигают длины 50—100 мкм, их ширина составляет 20—60 мкм.

Изменяет структуру также введение  $Cr_2O_3$  (рис. 5 д). Она также сформирована оплавленными кристаллическими образованиями, не имеющими четких элементов ограничения, причем менее плотная, по сравнению с исходной. На общем фоне спекшихся кристаллических сростков четко различаются мелкие, редко расположенные кристаллы. Они преимущественно округлые, изометрические, размер их составляет 5—12 мкм. Наблюдаются участки стекловидной фазы и наличие закрытых пор. Поры ориентированы бессистемно, их сечение щелевидное, нередко округлое, с расширениями и перегибами. Минимальный размер пор по длине составляет 5—15 мкм, иногда до 40 мкм. Ширина их колеблется в интервале 3—25 мкм.

Проведенные исследования позволили установить активное действие минерализующих добавок на процессы уплотнения черепка литийалюмосиликатной керамики во всем температурном интервале обжига образцов. Особенно активно эти процессы протекают при температуре 1200—1250 °С, когда обеспечивается образование значительных количеств стекловидного расплава.



Обогащение его оксидами, способствующими снижению вязкости жидкой фазы, повышению ее реакционной активности и смачивающей способности играет положительную роль в формировании структуры образцов. Значительное количество расплава приводит к взаимодействию продуктов термического разложения. Важную роль играет здесь химическое взаимодействие за счет растворения исходных минералов с последующим выделением из расплава термодинамически устойчивых фаз.

Вводимые добавки в конечном результате изменяют соотношение между кристаллическими и стекловидной составляющими, а также порами, присутствующими в материале.

Формирующиеся в процессе обжига кристаллические образования, установленные в составах керамических масс, содержащих добавки-модификаторы, позволят заключить, что они выполняют роль армирующих компонентов в структуре литийалюмосиликатной керамики, обеспечивая повышение механической прочности и других физико-химических свойств изделий, а также их термическую стойкость.

## Заключение

В результате проведенных исследований литийалюмосиликатной керамики, модифицированной добавками электрокорунда, серпентинита, кремнеземного стекловолокна и оксида хрома (III) установлены особенности формирования фазового состава и структуры образцов изделий. Исследованием фазового состава показано, что все модификаторы в значительной степени влияют на количественное содержание литийсодержащих фаз —  $\beta$ -сподумена и  $\beta$ -эвкритита, повышая их количество. Положительную роль в формировании структуры играет также муллит, имеющий игольчатую форму кристаллов, и обеспечивающий армирующую роль в структуре полученных материалов. Определено снижение содержания  $\alpha$ -кварца за счет его перехода в расплав, что уменьшает значения ТКЛР, повышая

термостойкость и электротехнические свойства образцов. Положительную роль в структуре термостойкой керамики играет также небольшой рост содержания корунда и волластонита.

Наиболее значима роль в формировании литийсодержащих фаз имеет введение электрокорунда в количестве 5—10 %. Заметный количественный рост литийсодержащих фаз обеспечивается также добавкой 3 % кремнеземного волокна и 10 % серпентинита. Менее значима роль в этом процессе оксида хрома (III).

Формирующиеся в процессе обжига кристаллические фазы обеспечивают повышение механической прочности при изгибе образцов, их термической стойкости и снижение водопоглощения.

Анализ взаимосвязи структуры, фазового состава и физико-химических свойств модифицированной литийалюмосиликатной керамики позволяет обеспечить регулирование ее свойств за счет структурно-управляемого синтеза.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Левицкий И.А., Кичкайло О.В., Тригубович А.И.* Исследование физико-химических свойств модифицированной керамики на основе системы  $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  // Огнеупоры и техническая керамика. — 2021. — № . С. @@
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. *Иванова В.П., Касатов Б.К., Красавина Т.Н., Розина Е.Л.* Термический анализ минералов и горных пород. Л.: Недра, 1974. — 176 с.
4. *Плющев В.Е., Степин Б.Д.* Химия и технология соединений лития, рубидия и цезия. — М.: Химия, 1970. — 410 с.
5. *Новый справочник химика и технолога.* Основные свойства неорганических, органических и элементоорганических соединений. — СПб: АНДНДП «Мир и семья», 2002. — 1280 с.
6. *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.