

К. Т. Н. Р. Ю. Попов, К. Т. Н. О. А. Сергиевич, К. Т. Н. Т. В. Колонтаева,
К. Т. Н. Е. О. Богдан (✉), К. Т. Н. Е. М. Дятлова

Белорусский государственный технологический университет,
Минск, Республика Беларусь

УДК 666.3:[549.613.4+549.6].017:620.186.5

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЛИТО-ТИАЛИТОВОЙ КЕРАМИКИ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ ОКСИДАМИ ТИПА RO_2

Приведены результаты исследования физико-химических, теплофизических свойств и фазового состава термостойких керамических материалов, синтезированных на основе системы $Al_2O_3-SiO_2-TiO_2$. Изучено влияние модифицирующих добавок типа RO_2 (ZrO_2 , SnO_2 , CeO_2 и MnO_2) на процессы спекания и фазообразования керамических материалов. Установлено, что образцы муллит-тиалитовой керамики, модифицированные оксидами SnO_2 и CeO_2 в количестве 5 и 7,5 % соответственно, характеризуются значениями водопоглощения от 0,2 до 2,2 % и ТКЛР в диапазоне $2,4 \cdot 10^{-6}$ – $3,2 \cdot 10^{-6} K^{-1}$. Разработанные материалы выдерживают более 70 циклов нагревания и охлаждения и могут использоваться для работы в условиях резких перепадов температур.

Ключевые слова: муллит-тиалитовая керамика, минерализаторы, ТКЛР, термостойкость, механическая прочность, теплопроводность.

Одной из главных задач современного материаловедения, связанных с развитием новых отраслей высокотемпературной техники, является разработка новых керамических материалов, обладающих высокими показателями огнеупорности, термостойкости и механической прочности, способных длительное время работать в условиях резких перепадов температур. Анализ патентно-информационных данных и результатов ранее проведенных исследований показал, что требуемый комплекс свойств керамических материалов может быть получен сочетанием в них высокопрочной кристаллической фазы муллита ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) и титаната алюминия (тиалита, $Al_2O_3 \cdot TiO_2$), характеризующегося низким ТКЛР ($-0,44 \cdot 10^{-6} K^{-1}$).

С этой точки зрения представляет интерес система $Al_2O_3-SiO_2-TiO_2$, в которой тройные соединения не образуются, но имеются обширные области кристаллизации двойных соединений: муллита и тиалита, сочетание которых является предпосылкой синтеза материалов с высокой термостойкостью и достаточной химической стойкостью [1–3]. На основе данной системы рядом исследователей были синтезированы огнеупорные материалы с использованием чистых оксидов и природного сырья (огнеупорной глины и каолина), изучен фазовый состав керамики в

зависимости от соотношения компонентов экспериментальных масс, а также условий синтеза. Установлено, что титанат алюминия формируется только при 1400 °C и выше. При указанных температурах синтеза катион титана Ti^{4+} может входить в структуру муллита, при этом происходит увеличение объема его элементарной ячейки. Растворимость TiO_2 в муллите может составлять 2–4 %, что согласуется с данными о содержании TiO_2 в природном муллите. Если температура синтеза ниже 1400 °C, TiO_2 присутствует в полученных материалах в виде рутила в сочетании с муллитом и непрореагировавшим глиноземом [4–6].

Показатели водопоглощения и открытой пористости материалов, полученных на основе данной системы, имеют достаточно высокие значения даже после обжига при 1400 °C и мало снижаются при ее повышении до 1440 °C. Это свидетельствует о недостаточной степени спекания, которое происходит в основном по твердофазному механизму. Согласно диаграмме состояния $Al_2O_3-SiO_2-TiO_2$ инвариантная точка, являясь общей для полей кристаллизации корунда, муллита и тиалита, имеет высокую температуру плавления 1710 °C и носит реакционный характер, так как лежит вне поля фазового треугольника указанных трех соединений [1–3, 6].

Доля переноса вещества посредством жидкофазного механизма при спекании смесей данной системы очень мала, поскольку образование расплава в основном обусловлено присутствием примесных оксидов в природном глинистом сырье (CaO , MgO , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O). Количество образующейся жидкой фазы недостаточно для заполнения порового пространства. Повышение температуры спекания ускоряет диффу-



Е. О. Богдан
E-mail: bohdan_ekaterina@mail.ru

зионные процессы в твердой фазе, а также несколько увеличивает реакционную способность расплава. Незначительное изменение при этом критериальных свойств спекаемых образцов свидетельствует о недостаточно эффективной температурной интенсификации спекания. Для данной системы целесообразно осуществлять активирование процессов спекания путем введения специальных минерализаторов, которые ускорят перенос вещества без увеличения количества расплава, так как образующаяся из него стеклофаза снижает термомеханические характеристики материалов, и в первую очередь увеличивает ТКЛР [7–9].

Для синтеза термостойких материалов, обладающих требуемым комплексом свойств и сравнительно невысокой температурой спекания, выбрана небольшая область исходных составов смесей в системе $Al_2O_3-SiO_2-TiO_2$, лежащая вблизи пограничной линии, разделяющей поля кристаллизации муллита и тиалита (рис. 1). Химические составы исследуемых смесей 1–7 указаны на диаграмме состояния системы $Al_2O_3-SiO_2-TiO_2$ (см. рис 1).

Химический состав исходных смесей, мас. %: Al_2O_3 30–45, SiO_2 25–40, TiO_2 30–35.

В качестве сырьевых компонентов использовали технический глинозем марки ГК-2 (ГОСТ 30998), огнеупорную глину Веселовского месторождения «Веско-Гранитик» (ТУ 14.2 00282049-003-2007), диоксид титана (ГОСТ 9808-84).

Опытные образцы получали методом полусухого прессования из опытных смесей, приготовленных совместным помолом исходных компонентов в планетарной мельнице. Обжиг образцов проводили в электрической печи при

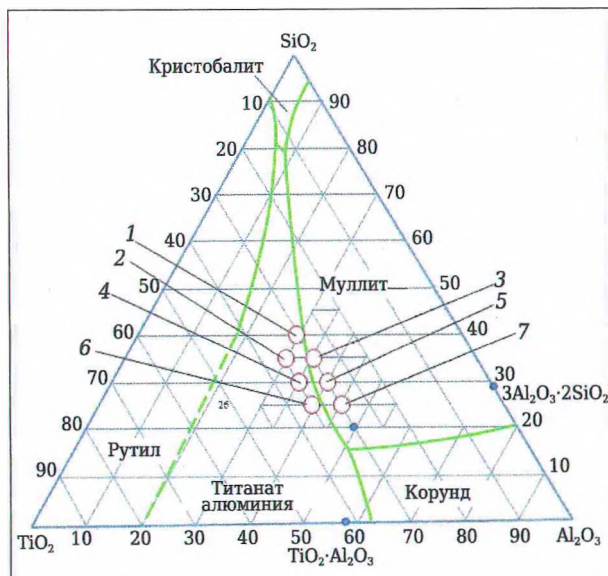


Рис. 1. Диаграмма состояния системы $Al_2O_3-SiO_2-TiO_2$ и опытные составы смесей (1–7)

1350, 1400 и 1450 °С с выдержкой при максимальной температуре 1 ч.

С целью изучения степени спекания материала исследовали критериальные свойства опытных образцов: водопоглощение (от 6,8 до 19,0 %), кажущуюся плотность (от 1995 до 2507 $кг/м^3$) и открытую пористость (от 16,8 до 39,0 %).

Установлено, что водопоглощение и открытая пористость образцов зависят не только от температуры обжига, но и от химического состава исходных смесей. При повышении температуры обжига показатели открытой пористости и водопоглощения образцов снижаются, но наиболее существенные изменения этих показателей наблюдаются только при температуре обжига 1450 °С. При этом минимальное значение водопоглощения образцов составляет 6,8 %, что свидетельствует о недостаточной степени спекания и подтверждает, что спекание осуществляется преимущественно по твердофазному механизму.

Образцы, полученные на основе экспериментальных составов, лежащих в области кристаллизации тиалита, спекаются лучше, чем материалы, полученные на основе композиций, находящихся в области кристаллизации муллита. Это отличие наиболее существенно проявляется при температуре обжига 1350 °С и уменьшается при ее повышении до 1450 °С. Следует отметить повышение водопоглощения образцов при увеличении содержания Al_2O_3 и TiO_2 взамен SiO_2 , что обусловлено высокой температурой плавления указанных соединений.

ТКЛР образцов, в отличие от показателей спекания, в большей степени зависит от температуры синтеза. При температуре обжига 1350 °С его значения находятся в пределах $3,99 \cdot 10^{-6} - 5,02 \cdot 10^{-6} K^{-1}$, а более высокие показатели характерны для материалов, относящихся к области кристаллизации тиалита. При повышении температуры обжига до 1400 °С и выше ТКЛР образцов резко уменьшается до $1,16 \cdot 10^{-6} - 3,29 \cdot 10^{-6} K^{-1}$, причем более высокие значения, наоборот, характерны для материалов, полученных на основе составов, лежащих в области кристаллизации муллита.

Это обусловлено, вероятно, образованием при данных условиях (1400 °С) малорасширяющейся фазы тиалита, и зависимость ТКЛР образцов от состава носит вполне логичный характер. При более низких температурах тиалит не формируется, при этом TiO_2 присутствует в обожженных образцах в виде кристаллической фазы рутила, которая повышает их ТКЛР.

Рентгенофазовый анализ образцов, обожженных при разных температурах, показал, что все исследованные образцы полиминеральны, в них присутствуют кристаллические фазы, характерные для системы $Al_2O_3-SiO_2-TiO_2$ (муллит, тиалит, рутил, корунд). Решающее влияние

на фазовый состав образцов оказывает температура синтеза. Во всех материалах, обожженных при 1350 °С, основной кристаллической фазой является муллит, в качестве примесных фаз присутствуют рутил и корунд; в небольших количествах образуется тиалит, о чем свидетельствуют малоинтенсивные дифракционные максимумы, характерные для этой фазы. Качественный фазовый состав практически не зависит от химического состава образцов. Следует отметить только некоторое увеличение содержания корунда в образцах керамики и уменьшение количества рутила при повышении концентрации Al_2O_3 в исходных смесях.

Дальнейшее повышение температуры обжига до 1400 °С значительно изменяет фазовый состав опытных образцов. Интенсивность дифракционных максимумов, характерных для кристаллических фаз корунда и рутила, резко уменьшается, так как при их взаимодействии образуется тиалит. Полного взаимодействия между Al_2O_3 и TiO_2 не происходит, так как фазы корунда и рутила идентифицируются во всех синтезированных образцах даже после обжига при 1450 °С. Соотношение между основными фазами муллита и тиалита зависит от положения точки исходного состава на диаграмме состояния.

На рис. 2 показаны результаты исследования фазообразования в образцах составов 2 и 3, включающих Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 в количестве 30, 35, 35 мас. % и 35, 35, 30 мас. % соответственно. Сравнение относительных интенсивностей основных дифракционных максимумов кристаллических фаз указанных образцов позволило установить, что количество тиалита в образце состава 2 больше, чем в образце состава 3, что согласуется с диаграммой состояния системы.

В результате проведенного исследования получены малорасширяющиеся материалы, которые представляют интерес для изготовления высокотемпературных изделий. Однако данные материалы характеризуются высокой температурой спекания (выше 1400 °С), повышенными значениями водопоглощения (6,8 %) и открытой пористости (16,8 %) при сравнительно невысо-

ких показателях механической прочности при сжатии (36–58 МПа). Поскольку повышение температуры обжига до 1450 °С не оказывает существенного влияния на свойства материалов, полученных в данной области системы, для интенсификации процесса спекания можно применить методы, основанные на введении минерализаторов, ускоряющих перенос вещества в твердой фазе [2, 10].

Анализ результатов исследований химического активирования процессов спекания экспериментальных керамических масс свидетельствует о том, что движущей силой указанных преобразований при синтезе материалов на основе оксидных систем являются формирование гетеровалентных твердых растворов с вводимыми минерализаторами, разница в степенях окисления металла в спекаемом оксиде и катиона добавки, а также энергетическая константа (по Форсману), которая для катиона добавки должна быть выше по сравнению с катионом спекаемого оксида. В связи с этим представляет интерес рассмотреть влияние добавок типа RO_2 с разными кристаллохимическими характеристиками на процессы спекания и формирование структуры керамики на основе системы Al_2O_3 – SiO_2 – TiO_2 .

Для проведения дальнейших исследований выбран состав 2. Оксиды алюминия, кремния и титана вводили следующими сырьевыми компонентами: огнеупорной глиной Веселовского месторождения «Веско-Гранитик», техническим глиноземом и диоксидом титана. На основании анализа литературных данных в качестве минерализаторов выбраны ZrO_2 , SnO_2 , CeO_2 и MnO_2 . Их характеристики в сравнении с оксидами, входящими в состав исходного керамического материала, приведены в табл. 1.

Минерализаторы вводили в состав исходной смеси в количестве от 2,5 до 10 мас. % в виде оксидов квалификации х. ч. Образцы изготавливали по ранее приведенной методике и обжигали при 1300, 1350 и 1375 °С с выдержкой при максимальной температуре 1 ч.

Основные свойства опытных образцов в зависимости от вида и количества добавок, а так-

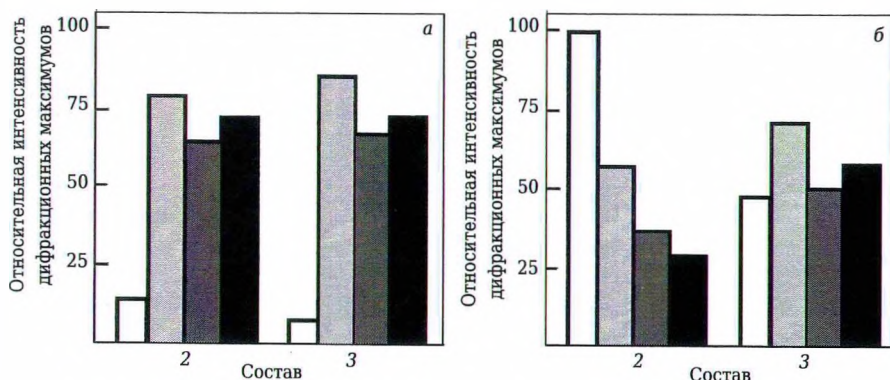


Рис. 2. Относительная интенсивность дифракционных максимумов кристаллических фаз образцов, обожженных при 1300 (а) и 1400 °С (б): □ — тиалит; ▨ — муллит; ■ — корунд; ■ — рутил

Таблица 1. Кристаллохимические и физические характеристики оксидов

Оксид	Плотность, кг/м ³	Температура плавления, °С	Ионный радиус катиона, нм		Кристаллохимические характеристики добавки
			по Гольдшмидту	по Полингу	
ZrO ₂	5730	2680	0,087	0,08	Гексагональная, тетрагональная, кубическая
CeO ₂	7300	Выше 2600	0,102	0,101	Кубическая
SnO ₂	6950	Разлагается при 1127	0,074	0,071	Тетрагональная
MnO ₂	5026	Разлагается при 535	0,07	–	Ромбическая, гексагональная
TiO ₂	3840–4260	1855	0,064	0,068	Тетрагональная, ромбическая
Al ₂ O ₃	3500–3990	2010–2050	0,057	0,05	Гексагональная, кубическая
SiO ₂	2220–2655	1670–1720	0,039	–	Гексагональная, кубическая, тетрагональная

же от температуры обжига представлены на рис. 3, 4.

Установлено, что введение оксидов RO₂ в состав керамического материала оказывает влияние на степень спекания и на показатели физико-химических характеристик. Показатели спекания опытных образцов при введении модификаторов улучшаются во всем температурном интервале обжига, но наиболее интенсивно этот процесс протекает при 1375 °С и содержании добавок RO₂ в количестве 7,5 и 10 мас. %.

Синтез исследуемых материалов происходит в результате спекания преимущественно по твердофазному механизму, доля жидкофазного спекания незначительна и обусловлена наличием примесей (CaO, MgO, R₂O) в глинистом компоненте, которые при спекании образуют эвтектические расплавы. Поскольку таких примесей с глиной вводится немного, количество образующегося расплава незначительно, что, безусловно, не может обеспечить заполнение порового пространства спекаемой системы. Пе-

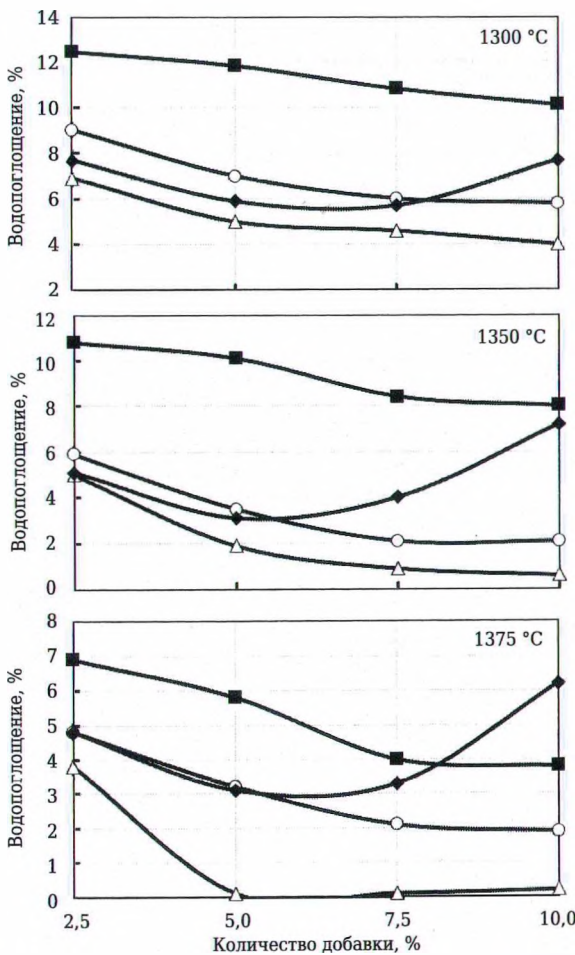


Рис. 3. Зависимость водопоглощения опытных образцов, обожженных при разных температурах, от количества и вида добавки: ■ — ZrO₂; Δ — SnO₂; ○ — CeO₂; ◆ — MnO₂

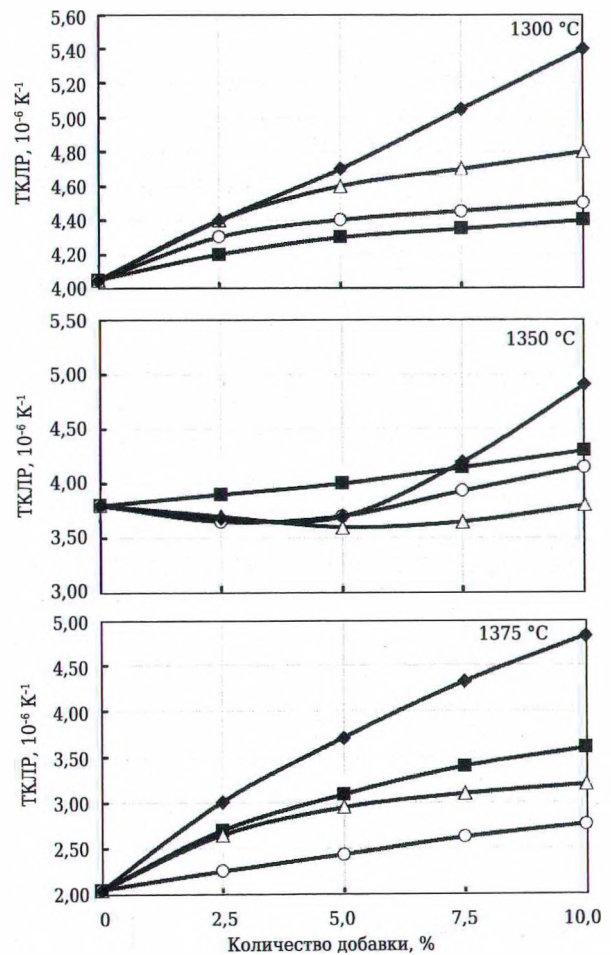


Рис. 4. Зависимость ТКЛР опытных образцов, обожженных при разных температурах, от количества и вида добавки: ■ — ZrO₂; Δ — SnO₂; ○ — CeO₂; ◆ — MnO₂

ренос вещества осуществляется главным образом за счет диффузионных процессов, обусловленных градиентом дефектов кристаллической решетки [11]. При температурах выше 1300 °С определенную роль в уплотнении материала играют силы поверхностного натяжения, которые вызывают пластическую деформацию по границам зерен спекаемой системы и частичное заполнение порового пространства.

Исследованные оксиды-минерализаторы ZrO_2 , SnO_2 , CeO_2 имеют высокую температуру плавления (см. табл. 1) и в сочетании с исходной системой $Al_2O_3-SiO_2-TiO_2$ не образуют легкоплавких эвтектик, однако благодаря своим кристаллохимическим характеристикам могут изменять параметры кристаллической решетки оксидов спекаемой системы, образовывать с ними твердые растворы замещения при близости ионных радиусов или внедрения, если радиусы ионов отличаются. В кристаллической решетке тиалита Al_2TiO_5 катион титана Ti^{4+} может быть замещен катионами Sn^{4+} , Mn^{4+} , в меньшей степени Zr^{4+} и маловероятно катионами Ce^{4+} , ионный радиус которого значительно превышает радиус катиона Ti^{4+} (см. табл. 1) [12]. Вводимые оксиды-минерализаторы могут образовывать свои кристаллические фазы (например, ZrO_2) или обуславливать окислительно-восстановительные процессы (MnO_2) и тем самым влиять на фазовый состав и свойства спекаемой системы.

Экспериментальные данные показывают, что наиболее эффективно повышает степень спекания муллито-тиалитовой керамики SnO_2 . Водопоглощение опытных образцов при содержании SnO_2 7,5 и 10 мас. % и температуре обжига 1350 °С составляет менее 1 % (см. рис. 3). При повышении температуры обжига до 1375 °С минимальное водопоглощение (0,2 %) характерно для образцов, содержащих 5 мас. % SnO_2 . Минерализующее действие SnO_2 проявляет даже при температуре обжига 1300 °С, что подтверждается снижением водопоглощения образцов от 12,6 (для исходного состава) до 4 % (при введении 10 % SnO_2). Далее по эффективности влияния на процесс спекания стоит CeO_2 , введение которого в количестве 7,5 и 10 мас. % позволяет снизить водопоглощение до 2 %. ZrO_2 имеет самую высокую температуру плавления, ионный радиус Zr^{4+} на 35 % выше, чем у Ti^{4+} , поэтому его минерализующее действие проявляется в меньшей степени и только при более высокой температуре (1375 °С). Кроме того, ZrO_2 легко кристаллизуется в виде бадделеита или циркона (при взаимодействии с SiO_2).

В отличие от вышеуказанных оксидов, MnO_2 в данной системе ведет себя неоднозначно. При введении MnO_2 до 5 мас. % водопоглощение опытных образцов снижается, а при дальнейшем увеличении его количества (7,5–10 мас. %) зна-

чительно повышается. Как известно, MnO_2 при повышенных температурах склонен к разложению с образованием оксидов с меньшей степенью окисления и выделением кислорода. Протекание окислительно-восстановительных процессов с повышенным газовыделением может являться причиной увеличения пористости при спекании материала, что подтверждается показателями водопоглощения образцов (см. рис. 3). Такая зависимость критериальных характеристик спекаемых образцов от количества MnO_2 наблюдается при всех температурах обжига.

Кажущаяся плотность опытных образцов определяется двумя факторами: истинной плотностью материала и его общей пористостью. При снижении пористости при химическом и термическом активировании процессов спекания экспериментальных смесей кажущаяся плотность образцов увеличивается. Наблюдается полная корреляция между показателями водопоглощения и кажущейся плотности. Самые высокие показатели кажущейся плотности характерны для образцов, содержащих оксиды SnO_2 и CeO_2 , которые имеют высокую плотность (6950 и 7650 кг/м³ соответственно).

ТКЛР зависит как от температуры спекания (в большей степени), так и от вида и количества оксида-минерализатора. При температуре обжига 1300 °С ТКЛР находится в пределах $4,06 \cdot 10^{-6}$ – $5,36 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹ и мало зависит от вида и количества введенной добавки (см. рис. 4). Вероятно, при данной температуре малорасширяющаяся фаза (тиалит) не сформирована, поэтому даже образец исходного состава имеет ТКЛР более $4 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹. Повышение температуры обжига способствует снижению ТКЛР материала, что объясняется интенсификацией процессов спекания при 1375 °С и формированием кристаллической фазы тиалита, которая обеспечивает низкое термическое расширение.

Установлено, что все исследованные оксиды-минерализаторы способствуют увеличению показателей ТКЛР, что обусловлено образованием твердых растворов с меньшей степенью анизотропии кристаллической решетки, чем у Al_2TiO_5 , а также выделением других кристаллических фаз с большим термическим расширением. Наиболее высокие показатели ТКЛР характерны для образцов с добавками MnO_2 , в которых образуется марганецсодержащая кристаллическая фаза.

Данные РФА свидетельствуют о том, что при введении добавок в количестве 2,5 и 5 мас. % качественный фазовый состав образцов изменяется незначительно.

В табл. 2 приведены результаты анализа дифрактограмм опытных образцов исходного состава и с добавками оксидов-минерализаторов RO_2 в количестве 7,5 мас. %, обожженных при 1375 °С.

Таблица 2. Фазовый состав опытных образцов исходного состава и с оксидами-минерализаторами RO_2

Оксид-минерализатор RO_2 (7,5 мас. %)	Кристаллические фазы	
	основные	примесные
Исходный состав	Муллит, титанат алюминия	Рутил, корунд
ZrO_2	Муллит, рутил	Циркон, титанат алюминия, корунд
SnO_2	Муллит, титанат алюминия, рутил	Корунд
CeO_2	Муллит, рутил, титанат алюминия	Корунд
MnO_2	Муллит, рутил, корунд	α -Кварц, силикат марганца

Добавка оксидов SnO_2 и CeO_2 не оказывает существенного влияния на фазовый состав полученных образцов. Катионы Sn^{4+} и Ce^{4+} , вероятно, замещают Ti^{4+} в структуре Al_2TiO_5 , при этом остается непрореагировавший рутил, количество которого, судя по интенсивности основных дифракционных максимумов (0,325 и 0,168 нм), выше, чем в образце исходного состава. Кристаллическая фаза корунд в исследуемых образцах является примесной.

Более значительно изменяется качественный фазовый состав образцов при введении ZrO_2 . Основными фазами являются муллит и рутил, в результате взаимодействия ZrO_2 и SiO_2 формируется новое кристаллическое соединение циркон ($ZrSiO_4$). Титанат алюминия образуется в небольшом количестве, о чем свидетельствуют малоинтенсивные дифракционные максимумы, характерные для этой фазы.

При введении в систему MnO_2 малорасширяющаяся анизотропная фаза титаната алюминия не образуется, рутил и корунд присутствуют в виде непрореагировавших основных фаз наряду с муллитом, интенсивность формирования которого при этом уменьшается. Дополнительными фазами являются α -кварц и силикат марганца ($MnO \cdot SiO_2$).

Качественное и количественное изменения фазового состава синтезированных материалов оказывают значительное влияние на их свойства, и в первую очередь на ТКЛР. Отсутствие кристаллической фазы титаната алюминия в марганецсодержащих образцах обуславливает повышенные значения ТКЛР, в 2 раза превышающие эти показатели для исходного состава. Наиболее эффективно интенсифицируют процесс спекания SnO_2 и CeO_2 , не изменяя при этом качественный фазовый состав синтезированных материалов. Можно предположить, что катионы Sn^{4+} и Ce^{4+} внедряются в подрешетку титаната алюминия вместо иона Ti^{4+} , что снижает степень анизотропии его кристаллической структуры, в результате чего повышается плотность материала, но при этом несколько увеличивается его термическое расширение.

Таблица 3. Свойства образцов оптимальных составов

Параметр	Состав		
	2 (исходный)	5S	7C
Водопоглощение, %	9,2	0,2	2,15
Кажущаяся плотность, kg/m^3	2640	3670	3360
Открытая пористость, %	24,3	0,73	7,22
Предел прочности, МПа:			
при сжатии	76,2	216,5	128,2
при изгибе	29,1	75,8	41,6
Теплопроводность, Вт/(м·К)	2,36	3,02	2,69
ТКЛР, $10^{-6} K^{-1}$	2,02	2,97	2,68
Термостойкость, циклы (800 °C – вода)	>70	>70	>70

В качестве оптимальных выбраны составы, включающие 5 мас. % SnO_2 (состав 5S) и 7,5 мас. % CeO_2 (состав 7C). Материалы, полученные на основе этих составов при 1375 °C, характеризовались низкими значениями водопоглощения 0,2–2,2 % и ТКЛР в диапазоне $2,4 \cdot 10^{-6}$ – $3,2 \cdot 10^{-6} K^{-1}$. Показатели свойств образцов оптимальных составов, синтезированных при (1370 ± 5) °C, представлены в табл. 3.

Разработанные материалы выдерживают более 70 циклов нагревания и охлаждения и могут использоваться для работы в условиях резких перепадов температур.

Термостойкие изделия, изготовленные из разработанных составов оптимального состава, прошли апробацию на ряде предприятий машиностроительной отрасли Республики Беларусь и подтвердили свои высокие эксплуатационные характеристики.

Библиографический список

1. **Бобкова, Н. М.** Физическая химия тугоплавких неметаллических и силикатных материалов / Н. М. Бобкова. — Минск : Высшая школа, 2007. — 301 с.
2. Диаграммы состояния силикатных систем. Тройные силикатные системы : справочник / ред. Н. А. Торопов [и др.]. — Ленинград : Наука, 1972. — 448 с.
3. **Суворов, С. А.** Эволюция структуры композиционного материала на основе титаната алюминия и муллита / С. А. Суворов, В. Н. Фищев, А. Н. Игнатьева // Огнеупоры и техническая керамика. — 2013. — № 3. — С. 3–9.
4. **Арбузова, Н. В.** Высокотемпературные материалы на основе титаната алюминия с участием муллита, шпинели, кордиерита / Н. В. Арбузова, С. А. Суворов // Традиции и инновации : материалы научной конференции, посвященной 187-й годовщине образования Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). — СПб. : изд-во СПбГТИ (ТУ), 2015. — С. 82.
5. **Perera, F. H.** Strength of aluminium titanate/mullite composites containing thermal stabilizers / F. H. Perera, A. Pajares, J. J. Meléndez // J. Eur. Ceram. Soc. — 2011. — Vol. 31, № 9. — P. 1695–1701. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.03.012>.

6. **Guedes-Silva, C. C.** Formation of aluminum titanate with small additions of MgO and SiO₂ / *C. C. Guedes-Silva, F. M. de Souza Carvalhob, Th. dos Santos Ferreira, L. A. Genova* // *Materials Research*. — 2016. — Vol. 19. — P. 384–388. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2015-0498>.

7. **Бобкова, Н. М.** Термостойкая керамика и стекло-керамика на основе титаната алюминия / *Н. М. Бобкова, Л. Н. Силч* // *Журнал ВХО им. Д. И. Менделеева*. — 1991. — Т. 36, № 5. — С. 564–569.

8. **Бобкова, Н. М.** Исследование процесса спекания огнеупорных материалов на основе системы Al₂O₃-SiO₂-TiO₂ / *Н. М. Бобкова, Е. М. Дятлова, Т. Н. Юркевич* // *Стекло, ситаллы и силикаты*. — Минск : Вышэйшая школа, 1984. — Вып. 13. — С. 87–92.

9. **Бобкова, Н. М.** Влияние температуры спекания на минералообразование и некоторые свойства матери-

алов в системе Al₂O₃-SiO₂-TiO₂ / *Н. М. Бобкова [и др.]* // *Стекло, ситаллы и силикаты*. — Минск : Вышэйшая школа, 1984. — Вып. 12. — С. 74–77.

10. **Волочко, А. Т.** Огнеупорные и тугоплавкие керамические материалы / *А. Т. Волочко, К. Б. Подболотов, Е. М. Дятлова*. — Минск : Беларус. навука, 2013. — 385 с.

11. **Гегузин, Я. Е.** Физика спекания / *Я. Е. Гегузин*. — М. : Наука, 1984. — 312 с.

12. **Эванс, А. Г.** Конструкционная керамика / *А. Г. Эванс, Т. Г. Лэнгдон*. — М. : Металлургия, 1980. — 256 с. ■

Получено 04.11.22

© Р. Ю. Попов, О. А. Сергеевич,
Т. В. Колонтаева, Е. О. Богдан,
Е. М. Дятлова, 2023 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

RUSWELD 2023

Международная специализированная выставка

«Оборудование, технологии и материалы для процессов сварки и резки»

23–26 октября 2023

ЦВК «Экспоцентр», павильон «Форум» 12+

Тематика

- Сварочное оборудование, материалы, технологии сваривания
- Оборудование и материалы для резки металла
- Промышленные роботы: роботизированные сварочные комплексы и сварочные роботы
- Пост-обработка, возобновление и повышение износостойкости изделий и конструкций
- Контроль качества на производстве: дефекты швов, соответствие изделия нормам и требованиям
- Инструменты и приспособления для сварочных работ
- Средства индивидуальной и коллективной защиты при проведении сварочных работ



www.expoctr.ru