

УДК 666.7

С.М. Логвінков ^а, О.Ю. Давидова ^а, А.А. Івашура ^а, О.М. Борисенко ^б, Г.М. Шабанова ^б,
А.М. Корогодська ^б

ТЕРМОДИНАМІКА УТВОРЕННЯ КОРДІЄРИТУ ПРИ ВИПАЛІ ВОДОПРОНИКНОЇ КЕРАМІКИ

^а Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, Україна

^б Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

Проведено аналіз впливу підвищення температури випалу на термодинамічну спрямованість твердофазних хімічних реакцій у системі $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ у напрямку кордієритоутворення. Виявлена термодинамічна спрямованість протікання твердофазних реакцій у системі $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ дозволяє визначити раціональні температури випалу матеріалів, що містять кордієрит, для виготовлення виробів різного призначення. При низькотемпературному випалі (до 1200 К) тонкодисперсних мас на основі талько-глино-глиноземистих композицій можна одержувати матеріали з високою відкритою пористістю, але невисокими характеристиками міцності, оскільки реакційне спікання реалізується в основному за рахунок реакцій з утворенням проміжних для синтезу кордієриту сполук та не завершеними процесами деструкції у природній мінеральній сировині. В інтервалі температур випалу 1200–1500 К термодинамічна ймовірність реакцій відразу за декількома механізмами кордієритоутворення збільшується, що повинно обмежувати зростання одиничних кристалів при загальній тенденції наростання їх кількості і, відповідно, позитивно відобразитися на показниках міцності і термостійкості матеріалів через низькі значення термічного коефіцієнту лінійного розширення. Температури випалу 1500–1659 К відповідають граничним для кордієритоутворення та сприяють консолідації матеріалу зі зміною характеру пористості з відкритої на закриту. Перевищення температур випалу вище 1659 К обумовлює термодинамічну нестабільність комбінації фаз кордієрит–корунд і може призвести до утворення браку через появу значної кількості розплаву у фазовому складі матеріалу.

Ключові слова: кордієрит, проникна кераміка, твердофазні реакції, спряження реакцій, температура випалу.

DOI: 10.32434/0321-4095-2024-153-2-55-60

Вступ

Розвиток проникної кераміки підпорядковується загальній закономірності еволюції матеріалознавства, що обумовлено необхідністю задовольняти зростаючі потреби людського суспільства у різних сферах матеріального виробництва та надання послуг. У даний час існує значна кількість різновидів проникної кераміки, які мають певні недоліки та суттєві переваги порівняно з проникними виробами із пластмас та металевих сплавів [1]. Недоліки проникної кера-

міки обумовлені її крихкістю, а переваги пов'язані з можливістю застосування недефіцитної природної мінеральної сировини, високою абразивною корозійностійкістю до багатьох агресивних середовищ, можливістю використання високотемпературної регенерації від біологічно небезпечних мікроорганізмів та інші. Проникна кераміка на основі амфотерних оксидів або їх сполук має підвищену універсальність та експлуатаційну надійність у кислих та лужних середовищах. Поряд з можливістю значно варіювати фазовий склад

© С.М. Логвінков, О.Ю. Давидова, А.А. Івашура, О.М. Борисенко, Г.М. Шабанова, А.М. Корогодська, 2024



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Thermodynamics of cordierite formation during firing of water-permeable ceramics

проникної кераміки (корундової, корундо-мулітової, шпінельної, кордієритової) за рахунок зміни співвідношення вихідних інгредієнтів у талько-глино-глиноземистих композиціях, для формування виробів можна застосовувати різні методи (шлікерне лиття, екструзію, пресування) [2]. Зазначені обставини визначають широке застосування пористих матеріалів системи $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ (далі застосовуватимуться скорочення: М – MgO , А – Al_2O_3 , S – SiO_2), а також виробів з них різних форм та габаритів [3–5].

Кордієрит ($\text{M}_2\text{A}_2\text{S}_5$, тут і далі застосовується оксидна форма запису сполук) має низку специфічних фізико-хімічних властивостей: високі діелектричні характеристики, низький термічний коефіцієнт лінійного розширення, корозійна стійкість до багатьох речовин в різних агрегатних станах, наявність порівняно великих каналів в кристалічній решітці гексаганальної форми тощо [6,7]. Відповідно, кордієритова кераміка охоплює різні сфери застосування, зокрема, носії каталізаторів допалювання димових газів та адсорбенти, фільтри грубого та тонкого очищення, розсікачі полум'я пальників і підкладки для ароматичних масел, електродугогасники та термостійкий посуд для смаження. Зазначені обставини зумовлюють дедалі більшу привабливість кордієритової кераміки для мереж готелів, ресторанів та їх великих комплексів, що мають підсобні підприємства, у тому числі водопідготовки та очищення відходів виробництв лазнево-пральних господарств, басейнів, варильних цехів, пунктів збору та концентрування відпрацьованих жирів відправки на установки для виробництва альтернативних видів палив, зокрема біодизельних. У той же час, вирішення актуального завдання розширення ринку збуту кордієритовмісної кераміки на готельно-ресторанні комплекси безпосередньо взаємопов'язана з її собівартістю, яка суттєво залежить від температури випалу [8–11].

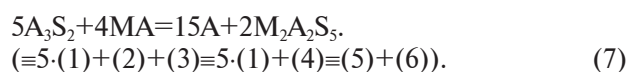
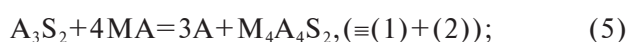
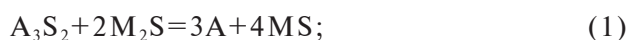
Мета роботи полягала у виконанні аналізу впливу підвищення температури випалу на термодинамічну спрямованість твердофазних хімічних реакцій у системі $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ у напрямку кордієритоутворення. Результати такого аналізу дозволять заводським технологам раціонально вибирати температуру випалу різноманітних виробів з матеріалів, що містять кордієрит, що позитивно відобразиться на їх рентабельності, нарощуванні обсягу виробництва і розширенні ринків збуту.

Методика експерименту

Для проведення досліджень застосовувався метод аналізу термодинамічної спрямованості протікання твердофазних реакцій. Метод заснований

на зіставленні значень зміни енергії Гіббса (ΔG) для досліджуваних реакцій за однакових температур (Т) [2]. При цьому традиційно прийнято вважати, що термодинамічно вигідним є розвиток твердофазної реакції у прямому напрямку (зліва направо) при негативному значенні ΔG , а позитивне значення ΔG відповідає термодинамічно вигідному розвитку реакції у зворотному напрямку (справа наліво). Термодинамічна перевага перебігу реакцій у напрямі визначається вищим значенням модуля негативної величини ΔG (тобто, наприклад, для двох реакцій 1 і 2, що порівнюються за конкретної температури, за умови $|\Delta G_1| > |\Delta G_2|$ більш вигідним з термодинамічної точки зору є протікання реакції 1).

У системі $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ фазоутворення на субсолідусній ділянці температур детерміновано протіканням семи твердофазних реакцій обміну [2,6], перевагу розвитку яких у різних температурних інтервалах і належало встановити. При аналізі реакцій не враховувалася можливість утворення твердих розчинів та приймалася формула стехіометричного сапфірину $\text{M}_4\text{A}_4\text{S}_2$, обґрунтована у роботі [6]. Перші три твердофазні реакції умовно вважали елементарними у зв'язку з тим, що решта реакцій є результатом їх спряження (нижче позначено знаком тотожності):



У нашому випадку спряження двох або більшої кількості реакцій може відбуватися за температури, що відповідає рівності значень ΔG (відповідно, термодинамічна ймовірність розвитку будь-якої з них однакова), коли в механізмах їх взаємодії є однакові сполуки, завдяки яким можливе об'єднання раніше розрізнених механізмів реакцій в єдиний і термодинамічно домінуючий механізм сумарної взаємодії (значення ΔG такої спряженої або сумарної реакції дорівнює сумі значень ΔG реакцій, що беруть участь у спряженні) [2,6]. Використовуваний термін «спря-

ження» має близьку аналогію з поняттям «стаціонарний стан» при досягненні рівності значень швидкостей хімічних реакцій у кінетичній теорії взаємодій.

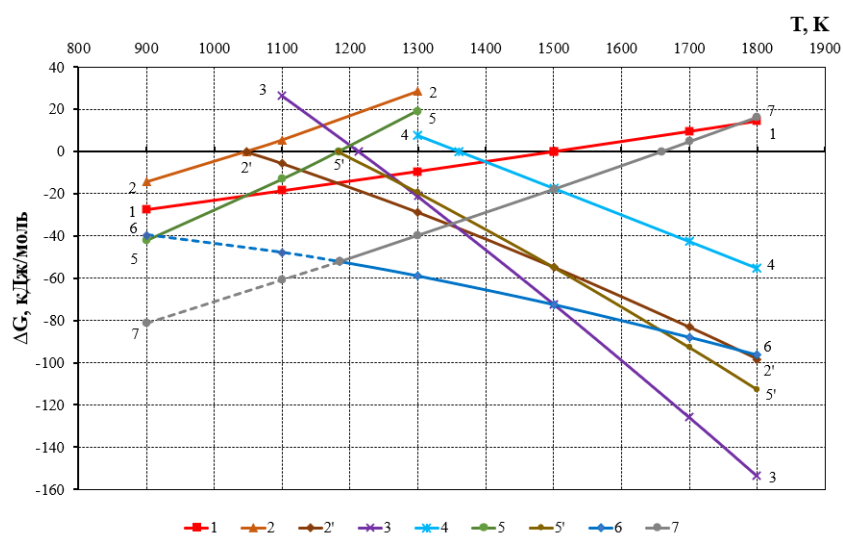
Значення ΔG розраховувалися з урахуванням температурної залежності сполук та інтегральними вкладками ентропійної та ентальпійної складових у загальну зміну енергії Гіббса аналізованих реакцій [2,6]. У таблиці вибірково надані значення ΔG за реперних температур, які достатні для побудови відповідних залежностей $\Delta G=f(T)$. У таблиці також зазначені температури оборотності реакцій (1)–(5) і (7), а для зручності аналізу залежностей для реакцій (2) та (5) значення ΔG окремо вказані для прямого напрямку протікання та зворотного (номер відповідної реакції відзначений символом «штрих»). Цей прийом застосований для кращої візуалізації термодинамічної переваги реакційної взаємодії (рисунок) і не викривляє точності розрахованих даних, оскільки значення ΔG для реакції в прямому і зворотному напрямку відрізняються лише знаком.

Результати та обговорення

З результатів розрахунку значень ΔG для аналізованих твердофазних реакцій (1)–(7) видно (таблиця), що лише одна реакція (6) не є оборотною в досліджуваному інтервалі температур. Відповідно, спостерігається (рисунок) багато точок перетину залежностей $\Delta G=f(T)$, що визначає не тривіальність вибору переважних для кордієритоутворення реакцій: (3), (4), (6) та (7). У низькотемпературній ділянці термодинамічно ймовірний перебіг двох елементарних реакцій: (1) і (2), які можуть спрягатися (точка перетину відповідних кривих $\Delta G=f(T)$ знаходиться за межами рисунка у низькотемпературній ділянці) та забезпечувати механізм взаємодії за реакцією (5). У продуктах цих реакцій немає кордієриту і утворюються лише необхідні для його синтезу проміжні сполуки, у тому числі сапфірин. Залежності $\Delta G=f(T)$ для реакцій (6) та (7) у низькотемпературній ділянці на рисунку розташовуються найнижче, що свідчить про термодинамічну можливість їх проходження. Однак, у механізмі цих реакцій має бути задіяна

Значення $\Delta G=f(T)$ для твердофазних реакцій

№ реакції	Т _{оборотності} , К	$\Delta G=f(T)$ за Т, К					
		900	1100	1300	1500	1700	1800
1	1501	-27,437	-18,526	-9,401	-0,067	9,473	14,322
2	1047	-14,522	5,492	–	–	–	–
3	1213	70,297	26,431	-21,222	-72,096	-125,734	-153,497
4	1360	55,775	31,923	7,456	-17,473	-42,916	-55,284
5	1183	-41,960	-13,035	–	–	–	–
6	–	-39,481	-47,647	-58,828	-72,355	-87,839	-96,206
7	1659	-81,411	-60,710	-39,554	-17,774	4,744	16,322
(2)'	–	–	-5,492	-28,678	-54,649	-83,115	-98,213
(5)'	–	–	–	-19,273	-54,577	-92,583	-112,529



Залежність $\Delta G=f(T)$ для твердофазних реакцій (пунктирами позначена умовна термодинамічна перевага розвитку)

термодинамічно не вигідна до 1213 К елементарна реакція (3). Тому, якщо тільки не використовуються заздалегідь синтезовані сполуки у стехіометричному співвідношенні реакцій (6) або (7), то у сумішевих композиціях (наприклад, талько-глино-глиноземистих або золь-гельних) синтез кордієриту мало ймовірний. За 1074 К елементарна реакція (2) стає термодинамічно не вигідною і за більш високих температур може продовжувати проходити «вгору» за рахунок надлишку вільної енергії Гіббса реакції (1) у загальному спряженні механізму реакції (5). Разом з тим, такі обмеження у поєднанні реакцій (1) і (2) можуть позитивно впливати на перенаправлення частини вільної енергії Гіббса реакції (1) для поєднання з елементарною реакцією (3), яка також, як і реакція (2), термодинамічно не вигідна (до 1213 К). Можна вважати, що вище 1047 К з'являється більш висока ймовірність термодинамічного спряження елементарних реакцій (1) і (3) в механізм взаємодії реакції (6); відповідно, аналогічна тенденція проявляється і на поєднанні реакцій (5) і (6) до розвитку єдиного механізму реакції (7). У продуктах взаємодії реакцій (6) і (7) кордієрит утворюється, але їх протікання у сумішевих мінеральних композиціях вкрай обмежене з кінетичних причин: низька температура і необхідність високої швидкості реакції (1) для розвитку чотирьох її прогонів з накопиченням реагентів, необхідних для поєднання в механізм реакції (6). Температура початку стабільного кордієритоутворення близько 1200 К, що обумовлено низькою обставин:

- за термодинамічно вигідною до 1183 К реакцією (5) утворилася достатня кількість проміжної для реакцій кордієритоутворення сполуки – сапфірину,

- з 1213 К стає термодинамічно вигідною елементарна реакція (3), яка відповідає за кордієритоутворення,

- пов'язана реакція (6) розвивається без термодинамічних обмежень, пов'язаних з попереднім перебігом реакції (3) «в гору»,

- реакція (6) стає найбільш термодинамічно ймовірною, оскільки з 1183 К для спряженої реакції (7) необхідно компенсувати перебіг реакції (5) в термодинамічно не вигідному напрямку,

- можливе спряження (6) і (7), що розширює різноманітність вихідних реагентів:



Від 1200 К кордієритоутворення активно відбувається за рахунок найбільш переважної реакції (6) і термодинамічно вигідної реакції (7), механізм якої гнучко адаптований до різних ва-

ріантів спряження. При цьому термодинамічна ймовірність протікання реакції (7) зменшується через зниження значень ΔG елементарної реакції (1) і необхідності компенсувати вільну енергію Гіббса елементарної реакції (2), що йде «в гору», на тлі швидкого збільшення негативних значень ΔG елементарної реакції (3). За температури 1306 К процес кордієритоутворення доповнюється ще й за рахунок розвитку твердофазної взаємодії за механізмом реакції (4), яка стає термодинамічно вигідною. Слід також врахувати, що близько 1350 К можливе поєднання реакцій (3) і (2') з реалізацією нового механізму кордієритоутворення: $\text{M}_4\text{A}_4\text{S}_2 + 6\text{MS} = 3\text{M}_2\text{S} + 2\text{MA} + \text{M}_2\text{A}_2\text{S}_5$. До 1500 К кордієритоутворення забезпечується декількома механізмами твердофазних вищенаведених реакцій.

Вище температури 1501 К стає термодинамічно не вигідна елементарна реакція (1), й істотно змінюються механізми твердофазних реакцій, де вона бере участь в спряженні. Насамперед у реакції (6) компенсація термодинамічної не вигідності реакції (1) змушена здійснюватися за рахунок поєднання з найбільш вигідною реакцією (3), графік залежності якої на рисунку розташований найнижче. Разом з тим, елементарна реакція (3), як і раніше, бере участь у спряженні реакції (4), де забезпечує компенсацію вільної енергії Гіббса для протікання елементарної реакції (2) у термодинамічно не вигідному напрямку. Отже, найбільш висока термодинамічна перевага протікання реакції (3) не має самостійного значення для кордієритоутворення при температурі вище 1501 К (за винятком її практичної реалізації із заздалегідь синтезованих MS і $\text{M}_4\text{A}_4\text{S}_2$ у відповідному стехіометричному співвідношенні), оскільки її вільна енергія Гіббса забезпечує протікання «в гору» елементарних реакцій (1) і (2) у спряжених реакціях (7), (4) та (6). Ці реакції вказані в порядку зростання термодинамічної переваги (дивитися розташування відповідних кривих на рисунку), яка забезпечується за рахунок енергетики реакції (3): 5·(1)+(2)+(3); (2)+(3) та 4·(1)+(3), відповідно. Підтримка зазначених спряжень замість самостійного протікання реакції (3) має додаткову перевагу для реакційної системи з позицій комбінаторики, оскільки підвищується ймовірність взаємодії різних варіантів взаємопоєднань вихідних реагентів з утворенням кордієриту в продуктах реакцій (7), (4) та (6).

Починаючи з 1659 К (температура оборотності реакції (7) – див. рис.) кордієритоутворення обмежується через термодинамічну вигідність взаємодії кордієриту з мулітом через проходження реакції (7) у зворотному напрямку. Причиною

цього є рівність термодинамічних ймовірностей реакцій (6) та (5'): відповідні залежності $\Delta G=f(T)$ для зазначених реакцій перетинаються на рисунку при 1659 К. Відповідно, вище 1659 К термодинамічно вигідніше витрачання сапфірину за реакцією (5'), що інгібує можливість перебігу реакції (6), в якій сапфірин є вихідним реагентом, а також реакцій (3), і, відповідно, $(4)\equiv(2)+(3)$ з цієї причини. Фактично, вище 1659 К аж до температури початку інконгруентного плавлення кордієриту за 1738 К (з утворенням значної кількості розплаву $\approx 93\%$ та $\approx 7\%$ A_3S_2 , закінчення: 1823 К) кордієритуотворення ще можливе, але лімітоване необхідністю конкуренції за вихідний реагент з більш термодинамічно вигідною реакцією (5'), де він витрачається. Саме тому комбінація фаз $M_2A_2S_5$ і А втрачає термодинамічну стабільність і починає реагувати за механізмом реакції (7) у зворотному напрямку протікання. Подальший аналіз залежностей $\Delta G=f(T)$ для реакцій, що розглядаються, за температур вище температур утворення в реакційній системі розплаву не є цілком коректним. Однак, відзначимо перетин залежностей $\Delta G=f(T)$ для реакцій (6) і (2') за 1755 К (рисунок), що відповідає термодинамічній перевазі реакції (2'), яка доповнює ймовірність витрачання сапфірину та приводить вже до його інконгруентного плавлення.

Висновки

Встановлена термодинамічна перевага протікання твердофазних реакцій у системі $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ дозволяє прогнозувати раціональні температури випалу матеріалів, що містять кордієрит, для виготовлення виробів різного призначення. При низькотемпературному випалі (до 1200 К) тонкодисперсних мас на основі талько-глино-глиноземистих композицій можна одержувати матеріали з високою відкритою пористістю, але невисокими характеристиками міцності, оскільки реакційне спікання реалізується в основному за рахунок реакцій з утворенням проміжних для синтезу кордієриту сполук та не завершеними процесами деструкції у природній мінеральній сировині. У таких матеріалах кількість утвореного кордієриту мінімальна, а може і не визначатися, що обмежує їх сфери застосування. Подібні матеріали можуть бути цікавими для готельно-ресторанних комплексів при виготовленні з них виробів: носіїв ароматичних речовин, гранульованих адсорбентів, фільтрів грубого очищення. В інтервалі температур випалу 1200–1500 К термодинамічна ймовірність реакцій відразу за декількома механізмами кордієритуотворення підвищується, що повинно обмежувати зростання одиничних кристалів при загальній тенденції на-

ростання їх кількості і, відповідно, позитивно відобразитися на показниках міцності і термостійкості матеріалів через низькі значення термічного коефіцієнта лінійного розширення. Для виготовлення проникної кераміки такі матеріали перспективні при виконанні функцій тонкої фільтрації – носії каталізаторів, мембранні підкладки для ультрафільтрації та термостійкі виробу для розсікання полум'я газових пальників. Температури випалу 1500–1659 К відповідають граничним для кордієритуотворення та сприяють консолідації матеріалу зі зміною характеру пористості з відкритої на закрито. Вироби, одержані з матеріалів у зазначеному інтервалі температур випалу, мають максимальну усадку, високі характеристики міцності і низьку проникність для рідин і газів. Відповідно, з таких матеріалів більш перспективно виготовляти щільні виробу електротехнічного призначення та термостійку кераміку. Перевищення температур випалу вище 1659 К обумовлює термодинамічну нестабільність комбінації фаз кордієрит – корунд і може призвести до утворення браку через появу значної кількості розплаву у фазовому складі матеріалу. Це особливо небезпечно за наявності великої кількості домішок легкоплавких оксидів у складі мінеральних сировинних компонентів через появу більш низькоплавких евтектик порівняно з температурою початку інконгруентного плавлення кордієриту (1738 К).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Логвинков С.М., Борисенко О.Н. Особенности организации поровой структуры керамических мембранных подложек // Сборник научн. трудов ПАО «УКРНИИ Огнеупоров им. А.С. Бережного». – 2014. – № 114. – С.145-155.
2. Логвинков С.М. Твердофазные реакции обмена в технологии керамики: монография. – Харьков: Изд-во ХНЕУ, 2013. – 248 с.
3. *Characterization and sintering of gels in the system $MgO-Al_2O_3-SiO_2$* / Einarsrud M.A., Pedersen S., Larsen E., Grande T. // *J. Eur. Ceram. Soc.* – 1999. – Vol.19. – No. 3. – P.389-397.
4. Lee S.-J. Processing of cordierite and hexacelsian precursor powders through solution-polymerization route // *J. Ceram. Soc. Jpn.* – 1998. – Vol.106. – No. 7. – P.654-659.
5. *Sinterability and mechanical properties of glass-ceramics in the system $SiO_2-Al_2O_3-MgO/ZnO$* / Dechandt I.C.J., Soares P., Pascual M.J., Serbena F.C. // *J. Eur. Ceram. Soc.* – 2020. – Vol.40. – No. 15. – P.6002-6013.
6. Логвинков С.М. Закономерности фазовых равновесий в системе $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ в решении

проблем синтеза, стабільності і застосування кордієриту // Вісн. нац. техн. ун-ту «ХПІ». – 2004. – № 33. – С.127-135.

7. Pilate P., Delobel F. Low thermal expansion ceramic and glass-ceramic materials // *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*. – 2021. – Vol.2. – P.47-58.

8. Li L. Preparation and properties of cordierite ceramics obtained via a pouring-sintering method // *Integr. Ferroelectr.* – 2021. – Vol.215. – No. 1. – P.103-115.

9. Processing and properties of dense cordierite ceramics obtained through solid-state reaction and pressure-less sintering / Obradovic N., Pavlovic V., Kachlik M., Maca K., Olcan D., Dordevic A., Tshantshapanyan A., Vlahovic B., Pavlovic V. // *Adv. Appl. Ceram.* – 2019. – Vol.118. – No. 5. – P.241-248.

10. Structure-controlled porous cordierite ceramics with high solid content prepared by pickering emulsion technique using sucrose as a porogen / Luan X., Li J., Feng W., Liu R., Liu S., Wang Z. // *Materials*. – 2022. – Vol.15. – Art. No. 3410.

11. Electrical, microstructural and physical characteristics of talc based cordierite ceramics / Yahya A., Soltan A.M., Mahani R., El Kaliouby B., Kenawy S., Hamzawy E.M.A. // *Silicon*. – 2023. – Vol.15. – P.2901-2919.

Надійшла до редакції 27.12.2023

THERMODYNAMICS OF CORDIERITE FORMATION DURING FIRING OF WATER-PERMEABLE CERAMICS

S.M. Logvinkov ^a, O.Y. Davydova ^a, A.A. Ivashura ^a, O.M. Borysenko ^{b, *}, H.M. Shabanova ^b, A.M. Korohodska ^b

^a Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine

^b National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

* e-mail: onborisenko@ukr.net

The analysis of the influence of an increase in firing temperature on the thermodynamic possibilities of solid-phase chemical reactions in the MgO–Al₂O₃–SiO₂ system in the direction of cordierite formation has been conducted. The thermodynamic direction of solid-phase reactions in the MgO–Al₂O₃–SiO₂ system allows determining rational firing temperatures of materials containing cordierite for the manufacture of products for various purposes. During low-temperature firing (up to 1200 K) of finely dispersed masses based on talc-clay-alumina compositions, materials with high open porosity but low strength characteristics can be obtained. This is because the reactive sintering mainly occurs due to reactions forming intermediates for cordierite synthesis and incomplete processes of destruction in natural mineral raw materials. In the firing temperature range of 1200–1500 K, the thermodynamic probability of reactions immediately via several cordierite formation mechanisms increases, which should limit the growth of individual crystals while increasing their quantity. This should positively affect the strength and heat resistance of materials due to low values of the thermal coefficient of linear expansion. Firing temperatures of 1500–1659 K correspond to the limits for cordierite formation and contribute to the consolidation of the material with a change in the nature of porosity from open to closed. Exceeding firing temperatures above 1659 K results in the thermodynamic instability of the cordierite-

corundum phase combination and can lead to the formation of defects due to the appearance of a significant amount of melt in the phase composition of the material.

Keywords: cordierite; permeable ceramics; solid-phase reactions; conjugation of reactions, firing temperature.

REFERENCES

1. Logvinkov SM, Borisenko ON. Osobennosti organizatsii porovoi struktury keramicheskikh membrannykh podlozhek [Features of the organization of the pore structure of ceramic membrane substrates]. *Sbornik Nauchnykh Trudov PAO «UKRNII Ogneuporov im. A.S. Berezhnogo»*. 2014; 114: 145-155. (in Russian).

2. Logvinkov SM. Tverdogaznye reaktsii obmena v tekhnologii keramiki [Solid state exchange reactions in ceramics technology]. Kharkiv: HNJeU; 2013. 248 p. (in Russian).

3. Einarsrud MA, Pedersen S, Larsen E, Grande T. Characterization and sintering of gels in the system MgO–Al₂O₃–SiO₂. *J Eur Ceram Soc*. 1999; 19: 389-397. doi: 10.1016/S0955-2219(98)00199-X.

4. Lee SJ Processing of cordierite and hexacelsian precursor powders through solution-polymerization route. *J Ceram Soc Jpn*. 1998; 106(7): 654-659.

5. Dechandt ICJ., Soares P, Pascual MJ, Serbena FC. Sinterability and mechanical properties of glass-ceramics in the system SiO₂–Al₂O₃–MgO/ZnO. *J Eur Ceram Soc*. 2020; 40: 6002-6013. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.07.032.

6. Logvinkov SM. Zakonomernosti fazovykh ravnesii v sisteme MgO–Al₂O₃–SiO₂ v reshenii problem sinteza, stabil'nosti i primeneniya kordierita [Regularities of phase equilibria in the MgO–Al₂O₃–SiO₂ system in solving problems of synthesis, stability and application of cordierite]. *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu «KhPI»*. 2004; 33: 127-135. (in Russian).

7. Pilate P, Delobel F. Low thermal expansion ceramic and glass-ceramic materials. *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*. 2021; 2: 47-58. doi: 10.1016/B978-0-12-818542-1.00048-5.

8. Li L. Preparation and properties of cordierite ceramics obtained via a pouring-sintering method. *Integr. Ferroelectr*. 2021; 215(1): 103-115. doi: 10.1080/10584587.2021.1911230.

9. Obradovic N, Pavlovic V, Kachlik M, Maca K, Olcan D, Dordevic A, et al. Processing and properties of dense cordierite ceramics obtained through solid-state reaction and pressure-less sintering. *Adv Appl Ceram*. 2019; 118(5): 241-248. doi: 10.1080/17436753.2018.1548150.

10. Luan X, Li J, Feng W, Liu R, Liu S, Wang Z. Structure-controlled porous cordierite ceramics with high solid content prepared by pickering emulsion technique using sucrose as a porogen. *Materials*. 2022; 15: 3410. doi: 10.3390/ma15093410.

11. Yahya A, Soltan AM, Mahani R, El Kaliouby B, Kenawy S, Hamzawy EMA. Electrical, microstructural and physical characteristics of talc-based cordierite ceramics. *Silicon*. 2023; 15: 2901-2919. doi: 10.1007/s12633-022-02205-5.