УДК 666.65

С.Г. Положай, О.В. Зайчук, О.А. Амелина, А.Г. Положай

КАРБІДОКРЕМНІЄВІ ДИСПЕРСНОЗМІЦНЕНІ МАТЕРІАЛИ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕВТЕКТИЧНИХ СКЛОЗВ'ЯЗОК КОРДІЄРИТОВОГО І СПОДУМЕН-КОРДІЄРИТОВОГО СКЛАДІВ

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна

Робота присвячена розробці складів карбідокремнієвої кераміки на склокристалічних зв'язках системи (Li_2O, MgO, MnO)−Al_2O_3−SiO_2, а також визначенню особливостей формування мікроструктури і фазового складу такої кераміки у взаємозв'язку з основними фізико-механічними показниками в умовах низькотемпературного спікання. За результатами проведених досліджень встановлено, що евтектичні склади скла в псевдобінарних системах «кордієрит (Mg)−кордієрит (Mn)», «сподумен−кордієрит (Mn)», «евкриптит−кордієрит (Mn)» можуть бути використані як ефективні склозв'язки при низькотемпературному спіканні карбідокремнієвих дисперснозміцнених матеріалів. Максимальні показники міцності на стискання (в межах 400−450 МПа) досягнуті після випалу при температурі 1400^{0}C для керамічних матеріалів, які одержані з використанням склозв'язки Mg/Mn кордієритового складу. В результаті формується «коробчаста структура» карбідокремнієвої кераміки внаслідок перерозподілу склофази під час випалу та утворення щільної малопористої мікроструктури в приповерхневому шарі керамічних матеріалів. Підвищення температури спікання кераміки до 1600^{0}C обумовлює суттєве зростання пористості її поверхневого шару (в 2−3 рази). При цьому середній приведений розмір пор також збільшується в 1,5−2 рази при зменшенні їх кількості. Це негативно впливає на механічні показники кераміки. Розроблені при температурі 1400^{0}C керамічні матеріали можуть бути використані як замінники досить дорогих високолегованих хром- і марганцевмісних сплавів, якими футерують гірничозбагачувальні машини і механізми, що працюють при переробці пульпи або шламу за умов інтенсивного абразивного зношування.

Ключові слова: карбідокремнієва кераміка, евтектичні склозв'язки, кордієрит, сподумен, фазовий склад, мікроструктура, фізико-механічні показники.

DOI: 10.32434/0321-4095-2026-168-5-85-96

Вступ

Розроблення технологій низькотемпературного спікання безкисневої кераміки, яка володіє підвищеними механічними показниками (міцності, твердості, зносостійкості та ударостійкості), є одним з пріоритетних завдань матеріалознавства в галузі керамічних матеріалів. На вибір основи для синтезу керамічних матеріалів з підвищеними механічними показниками впливає наявність високих показників в'язкості руйнування, міцності і твердості. Номенклатура безкисневої кераміки з підвищеними механічними ха-

© С.Г. Положай, О.В. Зайчук, О.А. Амелина, А.Г. Положай, 2026

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/).

рактеристиками, перш за все, представлена такими матеріалами, як SiC, B_4C, Si_3N_4. До головних недоліків карбідоборної і нітридокремнієвої кераміки варто віднести її порівняно невисоку теплопровідність, гіршу стійкість до високотемпературного окислення, а також високу вартість і складність технологічного процесу виробництва [1,2].

Комплексом високих фізико-механічних показників володіє карбідокремнієва кераміка при порівняно невисокій собівартості. В той же час, через ковалентний характер зв'язків технологія виготовлення щільноспеченої карбідокремнієвої кераміки потребує високих температур спікання (1800^{0}С і вище) [3]. Для зниження температури спікання можуть бути використані склозв'язки. Однак для склозв'язок характерна недостатньо висока здатність до поглинання енергії удару, що ускладнює їх ефективне використання для спікання карбідокремнієвої кераміки [4]. Вищими механічними показниками у порівнянні зі скловидними матеріалами відрізняються склокристалічні матеріали. В той же час технологія одержання карбідокремнієвих матеріалів на склокристалічних зв'язках не потребує спеціального вартісного обладнання і спеціальних умов виготовлення, що є їх суттєвою перевагою [5]. Серед різних алюмосилікатних систем, які традиційно використовують в технології ситалів, як склокристалічні зв'язки для спікання силіцій карбіду найбільш цікавими є матеріали кордієритового складу завдяки поєднанню високих термо-механічних показників і низької питомої ваги [6–8]. Однак одержання скла кордієритового складу в системі $MgO–Al_2O_3–SiO_2$ (MAS) потребує високих температур варіння (понад 1600^{0}С) [9]. Знизити температуру варіння і в'язкість склорозплавів MAS системи кордієритового складу можна за рахунок введення манган(II) оксиду, який в силікатних склоутворюючих системах виконує функцію плавня. Крім того, іони Mg^{2+} і Mn^{2+} характеризуються досить близькими значеннями іонних радіусів 0,74 Å і 0,91 Å, відповідно [10], що обумовлює можливість утворення широкого ряду ізоморфних твердих розчинів між магнієвим кордієритом і марганцевим кордієритом. Порівняно низькотемпературною також є літійвмісна алюмосилікатна система, в якій кристалізується сподуменова і евкриптитова фази з низьким температурним коефіцієнтом лінійного розширення (ТКЛР) [11–13]. Зазначені кристалічні фази забезпечують високі показники термічної стійкості і механічної міцності. Використання складів скла в евтектичних точках зазначених систем дозволить здійснювати спікання силіцій карбіду при знижених температурах і отримувати комплекс заданих фізико-механічних властивостей [14,15].

Враховуючи вищевикладене, необхідність розробки складів карбідокремнієвої кераміки на склокристалічних зв'язках системи (Li_2O, MgO, MnO)–Al_2O_3–SiO_2, а також встановлення особливостей формування мікроструктури і фазового складу такої кераміки у взаємозв'язку з основними фізико-механічними показниками в умовах низькотемпературного спікання визначає актуальність напрямку досліджень.

Матеріали і методи досліджень

Для приготування дослідних складів скла в системах $MgO–Al_2O_3–SiO_2$, $MnO–Al_2O_3–SiO_2$ (MAS) і $Li_2O–Al_2O_3–SiO_2$ (LAS) були використані матеріали технічної чистоти: глинозем технічний марки Г-0 (Al_2O_3 ≥99,0 мас.%), магній карбонат марки А ($MgCO_3$ ≥98,5 мас.%), літій карбонат марки А (Li_2CO_3 ≥98,5 мас.%), манган оксид (II) марки А (MnO ≥97,0 мас.%), силіцій(IV) оксид марки А (SiO_2 ≥99,0 мас.%). Змішування компонентів шихти проводили шляхом сумісного помелу в фарфорових кульових млинах. Вагове співвідношення між кулями та шихтою 4:1. Помел проводили до залишку на сітці № 08 не більше 1%. Варіння скла проводили в камерній електричній печі з карбідокремнієвими нагрівачами в корундових тиглях. Гомогенізаційну витримку склорозплаву проводили протягом 1 год при максимальній температурі варіння, яка для дослідних складів скла знаходилась в діапазоні 1400–1450^{0}С. Приготовлене скло охолоджували шляхом відливання на масивну стальну плиту.

Для приготування SiC дисперснозміцнених матеріалів використовували силіцій карбід «чорний» марки 53С виробництва ПрАТ «Запо-різький абразивний комбінат». Вміст SiC ≥97,0 мас.%. Використовували порошки зернистістю F1000, з показником D_{50}=4,5±0,8 мкм і діапазоном розміру часток SiC в межах 1÷10 мкм. Змішування шихтових компонентів SiC дисперсно-зміцнених матеріалів проводили в стальних барабанах в кульовому планетарному млині. Вагове співвідношення кулі:шихта дорівнювало 7:1. При змішуванні в барабан додавали бензин Нефрас С2 80 (розчинник «Калоша») та парафін марки П-2. Розчинник запобігав комкуванню шихти та налипанню на барабан в процесі змішування, а також розчиняв парафін, який в подальшому слугував технологічним зв'язуючим при формуванні. Після змішування шихти висушували без додаткового нагрівання в витяжній шафі. Дослідні зразки формували шляхом пресування

на гідра-влічному пресі. Зразки мали форму циліндрів з діаметром та висотою рівними 12 мм. Випал зразків SiC дисперснозміцнених матеріалів проводили в мулітокорундових капселях в засипці з технічного вуглецю марки К-354. Випал зразків проводили в камерній електричній печі з карбідокремнієвими нагрівачами відповідно до заданого температурно-часового режиму при максимальній температурі 1300–1600^{0}С. Швидкість підвищення температури в середньому становила 5^{0}С/хв.

Для визначення фізико-механічних і термічних властивостей керамічних матеріалів були використані загальноприйняті методики. Мінералогічний склад керамічних матеріалів визначали за допомогою рентгенофазового аналізу (РФА) на дифрактометрі Philips APD-15 у Co-Kα випромінюванні. Електронно-мікроскопічні дослідження керамічних зразків у зламі проводили з використанням скануючого електронного мікроскопа TESCAN Mira 3 LMU.

Результати і обговорення

При синтезі низькотемпературних склозв'язок для дисперснозміцнених карбідокремнієвих матеріалів були вибрані евтектичні склади К-5, S-7 і Е-8 в псевдобінарних системах «кордієрит (Mg)–кордієрит (Mn)», «сподумен–кордієрит (Mn)», «евкриптит–кордієрит (Mn)» (табл. 1).

Дослідні керамічні матеріали виготовляли при співвідношенні «SiC–склозв'язка», мас.%: 90:10 і 60:40.

Залежності властивостей зразків карбідокремнієвої кераміки від температури випалу наведені на рис. 1–4. Індекс 10 і 40 для зразків дослідної кераміки означає вміст склозв'язки (мас.%).

Експериментально встановлено, що розроблені склади скла дозволяють одержати щільноспечену карбідокремнієву кераміку при порівняно низьких температурах 1300–1400^{0}С. При цьому вміст склозв'язки у невеликій кількості 10 мас.% дозволяє отримати зразки з міцністю на стискання близько 350 МПа вже при температурі 1400^{0}С (рис. 4а), яка була досягнута не зважаючи на досить низьку щільність матеріалу в межах 2,55–2,57 г/см^3 (рис. 2а). Зі збільшенням вмісту склозв'язки до 40 мас.% щільність зразків кераміки зростає до 2,8 г/см^3 (рис. 2б), а показник міцності на стискання – до 450 МПа (рис. 4б). Різниця між властивостями керамічних зразків, одержаних із використанням різних склозв'язок, як правило, не перевищує 10–15%. Це можна пояснити тим, що властивості, а саме ТКЛР та температура початку розм'якшення (ТПР) дослідних склозв'язок, а також склокристалічних матеріалів на їх основі, є досить близькими (табл. 1). Проведений рентгенофазовий аналіз зразків керамічних матеріалів, випалених при 1400^{0}С і 1600^{0}С (рис. 5, 6) показує, що в них крім силіцій карбіду (наповнювача), спостерігається кристалізація кордієритової фази і β-сподумену для складів 40К та 40С/40Е відповідно, які містять 40 мас.% склозв'язки. Ці кристалічні фази також утворюються і при кристалізації чистих склозв'язок (табл. 1).

Слід зазначити, що одержані зразки кераміки характеризуються відмінностями їх міцності на стискання, пов'язаними з складом склозв'язки, що використовувалась. Так, максимальними показниками міцності на стискання володіють зразки складів 10К та 40К на кордієритовій зв'язці, а найнижчу мають зразки складів 10Е та 40Е на зв'язці Е8 (рис. 4.) з максимальним вмістом лужного компоненту (Li_2O) та мінімальною кількістю SiO_2 (табл. 1). Від природи склозв'язки, при її вмісті 40 мас.%, крім міцності на стискання, також залежить усадка керамічних зразків (рис. 1). У той же час відкрита пористість

Таблиця 1

Хімічний склад і термічні властивості дослідних склозв'язок

Номер складу	Хімічний склад, мас.%					Скло			Склокристалічний матеріал	
	Li_2O	MgO	MnO	Al_2O_3	SiO_2	Температура варіння, ^{0}С	ТПР, ^{0}С	ТКЛР, $\times10^{-7}$ ^{0}С$^{-1}$	ТКЛР, $\times10^{-7}$ ^{0}С$^{-1}$	Кристалічні фази
К5	0,00	6,85	10,99	33,26	48,90	1450	800	31,7	20,8	твердий розчин Mg/Mn кордієриту
С7	5,65	0,00	6,59	28,67	59,09	1440	760	34,9	20,9	β-сподумен
Е8	9,52	0,00	4,40	38,70	47,38	1400	720	33,7	27,3	β-сподумен, (Mn) кордієрит

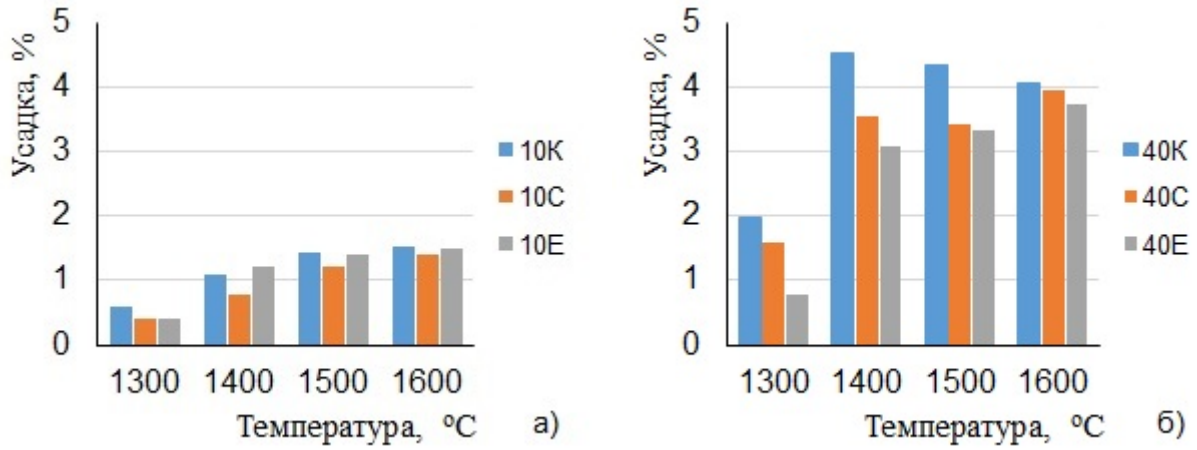


Рис. 1. Залежність усадки карбідокремнієвої кераміки від температури випалу при співвідношенні «SiC–склозв'язка», мас.%: а) 90:10; б) 60:40

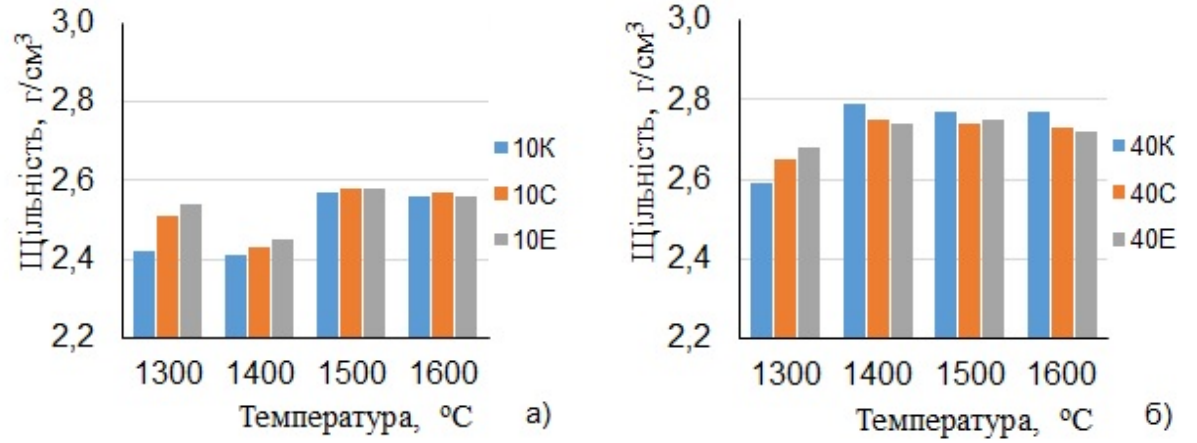


Рис. 2. Залежність уявної щільності карбідокремнієвої кераміки від температури випалу при співвідношенні «SiC–склозв'язка», мас.%: а) 90:10; б) 60:40

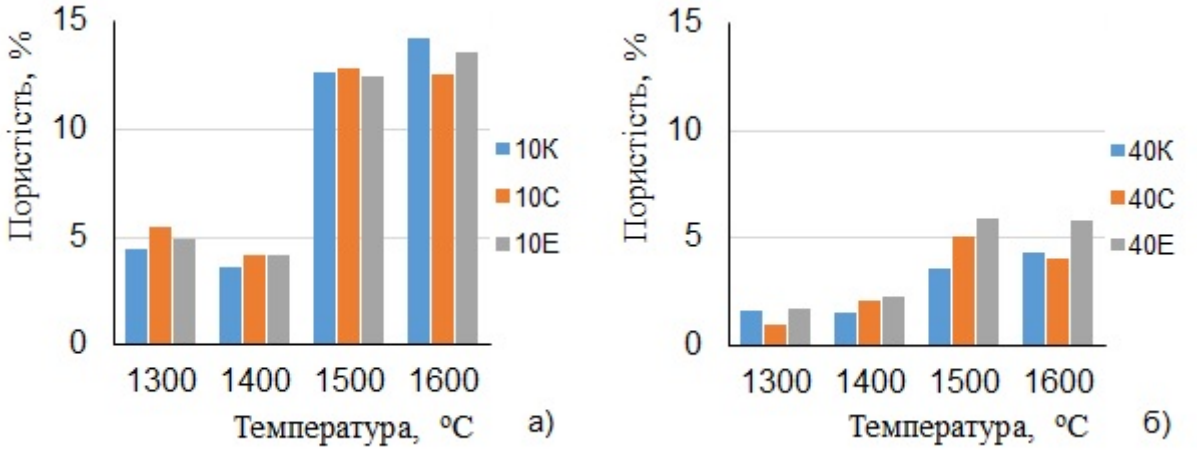


Рис. 3. Залежність відкритої пористості карбідокремнієвої кераміки від температури випалу при співвідношенні «SiC–склозв'язка», мас.%: а) 90:10; б) 60:40

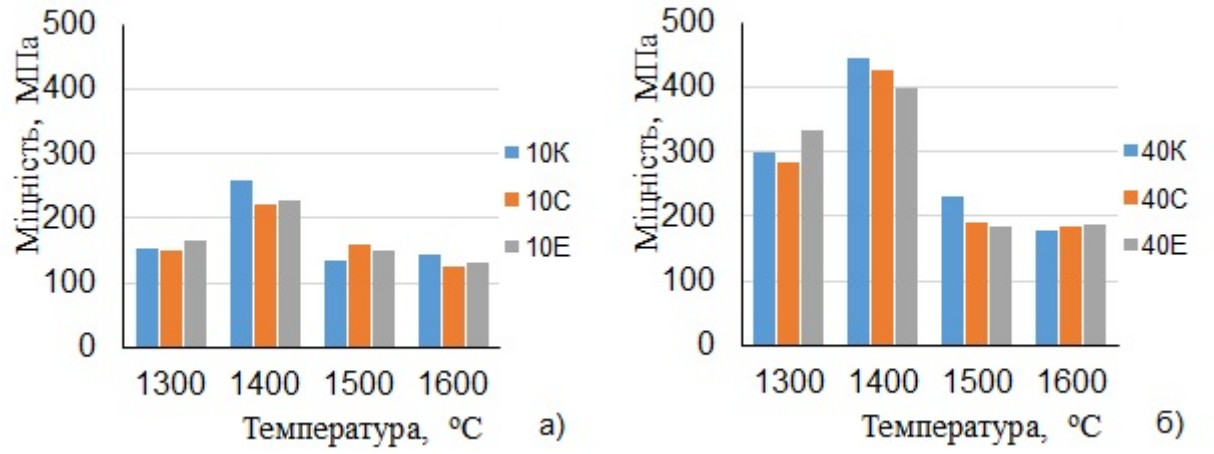


Рис. 4. Залежність межі міцності на стискання карбідокремнієвої кераміки від температури випалу при співвідношенні «SiC–склозв'язка», мас.%: а) 90:10; б) 60:40

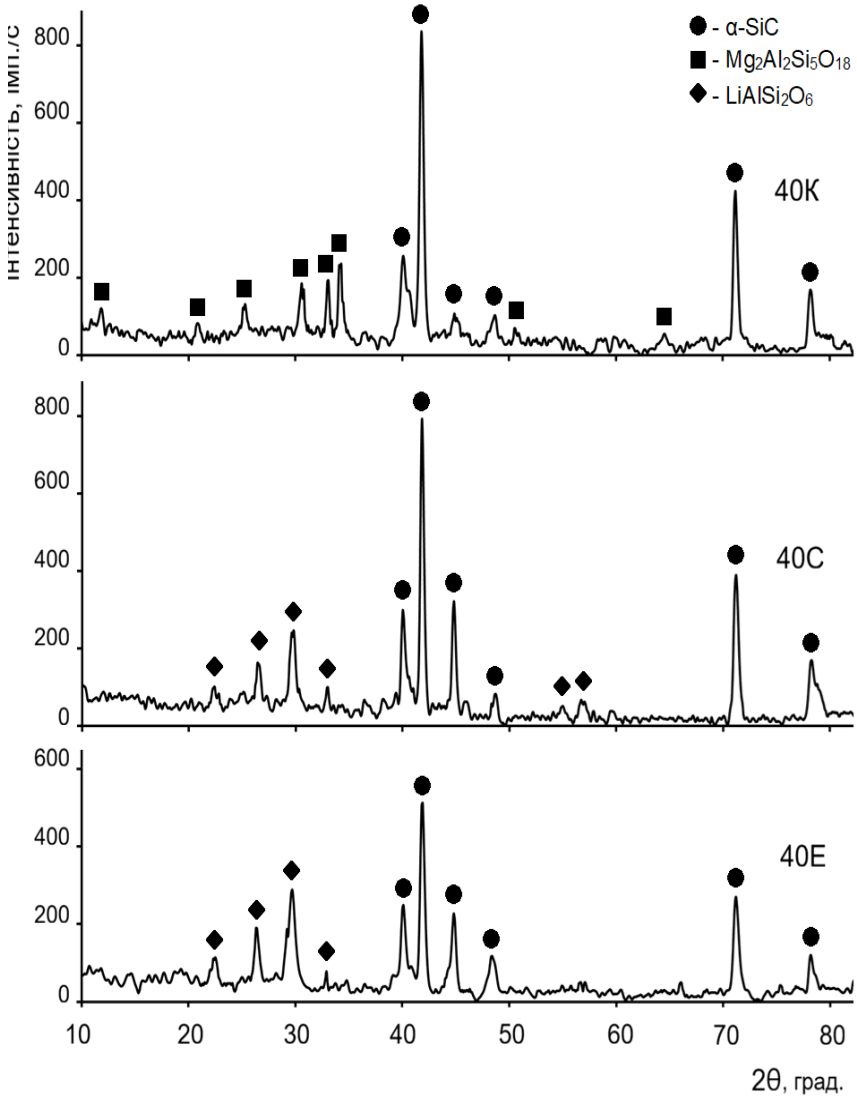


Рис. 5. Рентгенівські дифрактограми керамічних зразків, спечених при температурі 1400°С

практично не залежить від природи склозвя'зки (рис. 2), а показник уявної щільність корелюється з видом склозв'язки тільки при температурі спікання 1300^{0}С (рис. 3). Така поведінка добре пояснюється зниженням ТПР в ряду дослідних склозв'язок К5→С7→Е8 (табл. 1). Це обумовлює зниження в'язкості склозв'язок, яке сприяє збільшенню рухомості частинок карбідокремнієвого наповнювача і, відповідно, збільшенню усадки та ущільненню керамічного матеріалу.

Вирішальну роль у формуванні показників міцності на стискання керамічних зразків має температура їх спікання. З наведених даних видно, що температура 1300^{0}С є недостатньою для щільного спікання карбідокремнієвої кераміки. При цьому усадка та щільність є мінімальними як для складів з вмістом склозв'язки 10 мас.%, так і 40 мас.% (рис 1, 2). При підвищенні температури спікання до 1400^{0}С механічна міцність на стискання зростає до 400–450 МПа. Подальше підвищення температури спікання до 1500–1600^{0}С є недоцільним оскільки показники міцності різко зменшуються (в 2–2,5 рази). Цей ефект спостерігається як при вмісті склозв'язки 10 мас.%, так і особливо при вмісті склозв'язки 40 мас.% (рис. 4). Результати рентгенофазових досліджень (рис. 5, 6) показали, що кристалофазові склади керамічних зразків, які випалювали при температурах 1400^{0}С і 1600^{0}С, не мають відчутних відмінностей.

Залежність відкритої пористості від температури спікання кераміки також носить екстремальний характер, що особливо проявляється для зразків з вмістом склозв'язки 10 мас.% (рис. 3а). Значення відкритої пористості після спікання при температурах 1300–1400^{0}С складає близько 5%, а після спікання при температурах 1500–1600^{0}С різко зростає до 12–14%. При вмісті склозв'язки 40 мас.% різниця більш помірна (рис. 3б). Після спікання при температурах 1300–1400^{0}С відкрита пористість знаходиться в межах 2–3%, а з підвищенням температури до 1500–1600^{0}С – зростає до 4–6%. Це можна пояснити тим, що при низьких температурах спікання склозв'язка здебільшого концентрується в приповерхневому шарі зразків, а при підвищенні температури спікання склозв'язка розподіляється в об'ємі зразка більш рівномірно. На користь такого твердження свідчать результати скануючої електронної мікроскопії керамічних зразків, випалених при температурах 1400^{0}С (рис. 7) і 1600^{0}С (рис. 8). Зразки кераміки розколювали навпіл вздовж повздовжньої осі та сканували в двох точках: перша – біля центру бокового краю циліндричного зразка на відстані 0,5±0,1 мм від поверхні; друга – в радіусі 1 мм від геометричного центра зразка.

Аналіз результатів СЕМ зразків дослідної кераміки, випалених при температурах 1400^{0}С та 1600^{0}С, показав їх суттєві відмінності. Зразки, випалені при 1400^{0}С, мають неоднорідну мікроструктуру. Склозв'язка в них концентрується переважно в приповерхневому шарі, який має досить щільну структуру. На центральній же ділянці зразків кількість склофази знижується. В зразках, випалених при 1600^{0}С склозв′язка розподіляється рівномірно по всьому об'єму зразка. Мікрофотографії як поверхневої так і центральної ділянок зразків показують подібну структуру, яка складається з щільних ділянок та яскраво виражених мікропор.

Для кількісної оцінки характеристик мікроструктури керамічних зразків таких, як пористість, кількість, форма і розмір пор, виконували комп'ютерне оброблення мікрофотографій з використанням спеціалізованого програмного забезпечення. Візуальні результати роботи програми, яка дозволяє виділити пори та западини на мікрофотографії, наведено на рис. 7 і 8.

Виявлені мікропори виділені жовтим кольором, а щільні ділянки зразка – чорним. Числові параметри проведеного комп'ютерного аналізу зведені в табл. 2. Можна побачити, що як загальна пористість, так і кількість пор в приповерхневому шарі зразків, випалених при 1400^{0}С, в 2–4 рази менше ніж в центральній ділянці. Таким чином кераміка, випалена при 1400^{0}С, має «коробчасту» мікроструктуру, де в приповерхневому шарі утворюється щільний композит. Пористість поверхневого шару зразків, випалених при 1600^{0}С, в 2–3 рази більше, ніж у випалених при 1400^{0}С. Середній приведений розмір пор також збільшується в 1,5–2 рази, а їх кількість зменшується.

Все перераховане суттєво впливає на механічні властивості. Відомо, що на міцність керамічних матеріалів впливає як безпосередньо величина пористості, так і розмір пор. Кількісно, в межах 0–20%, залежність межі міцності на стискання від пористості лінійна, тобто при збільшенні пористості в поверхневому шарі зразків в 1,5–3,0 рази відповідно зменшується їх механічна міцність. Зростання розміру пор також знижує механічну міцність [1].

Таким чином, при підвищенні температури випалу з 1400^{0}С до 1600^{0}С відбувається зменшення показників міцності приповерхневого шару керамічних зразків при одночасному зростанні показників міцності їх серцевини. Однак під час механічного впливу найбільші напруження ви-

никають саме в поверхневій частині зразків, а їх «коробчаста» структура сприяє підвищенню міцності. Очевидно, що виникнення «коробчастої» структури керамічних зразків пов'язане зі зміною властивостей склофази. При підвищенні температури в'язкість склорозплаву знижується, що полегшує як її перерозподіл між зернами силіцій карбіду, так і рухливість самих часток силіцій карбіду за механізмом теплових коливань (броунівський рух). В той же час при підвищенні температури рідини зменшується її поверхневий натяг. А як відомо [4], капілярний тиск прямо пропорційний поверхневому натягу. Таким чином, можна припустити, що при менших температурах за рахунок поверхневого натягу склофаза підіймається в поверхневі шари кераміки, а підвищена в'язкість обмежує процеси масопереносу і відповідно росту пор. При підвищенні температури спікання зменшення поверхневого натягу сприяє рівномірному розподілу склофази в об'ємі кераміки, а менша в'язкість сприяє процесам коалесценції пор (зменшенню їх кількості, але зростанню розміру).

З параметрів текстури керамічних матеріалів, які впливають на механічні властивості, розглядався фактор форми пор. Відомо, що округлі пори, наближені до сферичних, знижують міцність менше ніж витягнуті гострокутні [4]. Оцінку форми пор проводили за коефіцієнтом сферичності, який характеризує співвідношення між пе-

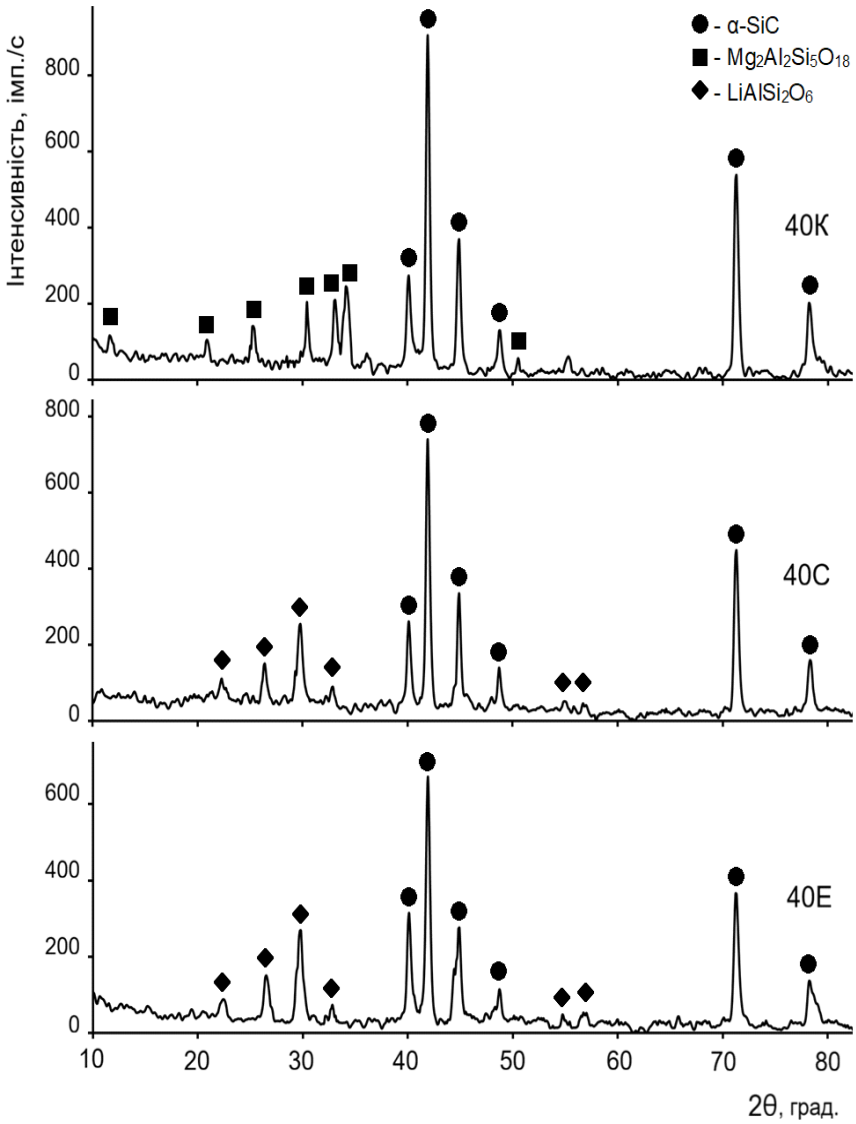


Рис. 6. Рентгенівські дифрактограми керамічних зразків, спечених при температурі 1600°C

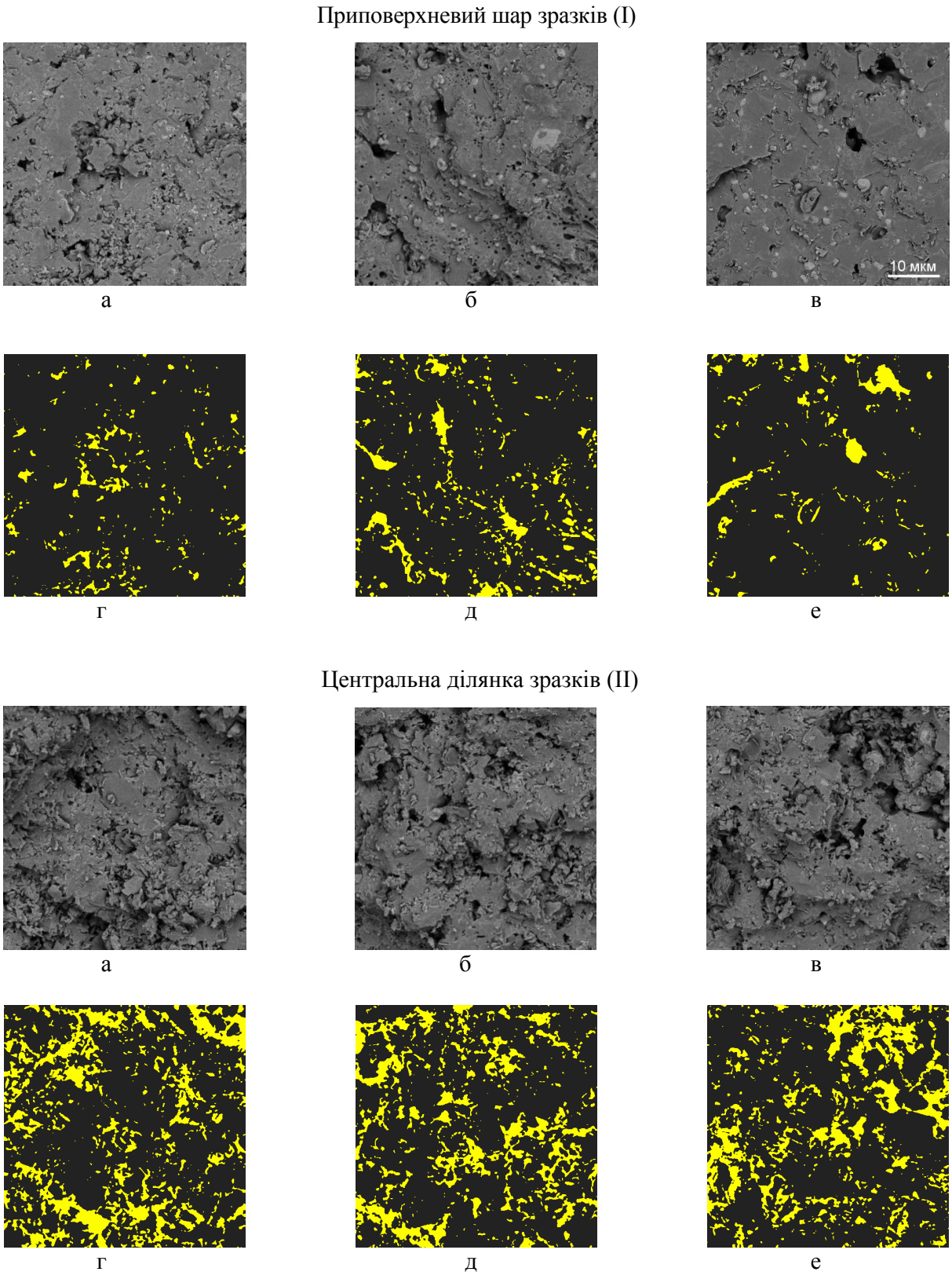


Рис. 7. СЕМ знімки зразків дослідної кераміки, випаленої при 1400^{0}С (а, б, в) і результати комп'ютерного аналізу отриманих зображень (г, д, е): кераміка 40К (а, г), 40С (б, д), 40Е (в, е). Розмір фото 500×500 пікселів, ≈50×50 мкм

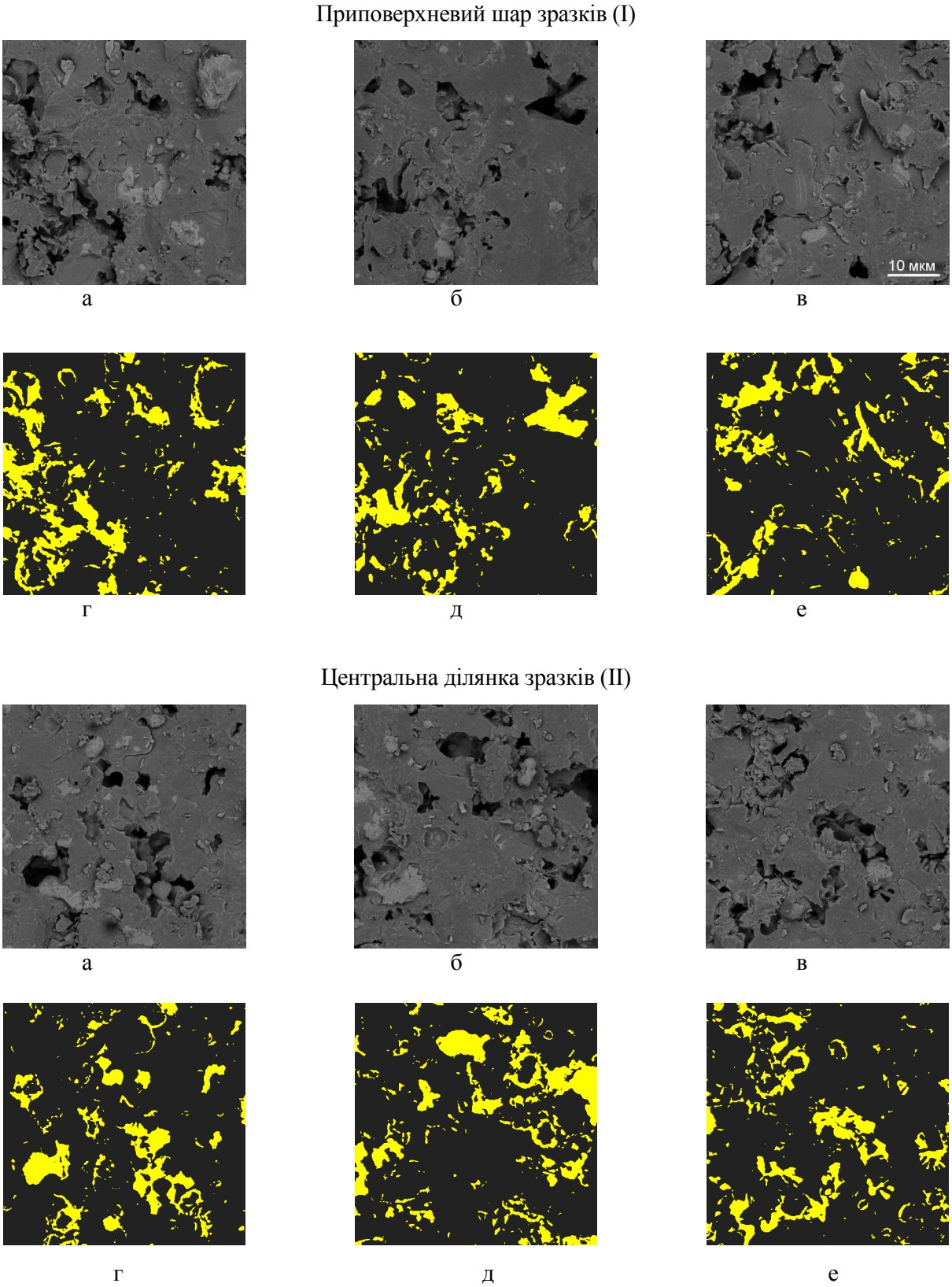


Рис. 8. СЕМ знімки зразків дослідної кераміки, випаленої при 1600^{0}С (а, б, в), та результати комп'ютерного аналізу отриманих зображень (г, д, е): кераміка 40К (а, г), 40С (б, д), 40Е (в, е). Розмір фото 500×500 пікселів, ≈50×50 мкм

Таблиця 2

Результати комп'ютерного оброблення СЕМ поверхні сколу керамічних зразків

Властивості	Поверхневий шар зразків			Центральна ділянка зразків		
	40К	40С	40Е	40К	40С	40Е
Температура випалу 1400^{0}С						
Пористість, %	5,1	9,26	5,8	21,7	19,4	19,6
Кількість пор, од.	349	454	233	505	458	463
Середній приведений діаметр пор, мкм	0,45	0,51	0,55	0,66	0,65	0,63
Коефіцієнт сферичності	0,23	0,24	0,24	0,25	0,24	0,26
Температура випалу 1600^{0}С						
Пористість,%	16,0	13,2	12,2	13,0	16,3	13,4
Кількість пор, од.	198	214	196	210	250	238
Середній приведений діаметр пор, мкм	0,79	0,74	0,74	0,72	0,76	0,74
Коефіцієнт сферичності	0,23	0,23	0,23	0,24	0,22	0,23

риметром пори та довжиною кола з площею, що відповідає площі досліджуваної пори. Програмні розрахунки показали, що не зважаючи на зростання середнього приведеного діаметру пор при підвищенні температури, їх форма залишається витягнутою при близькому коефіцієнті сферичності, який знаходиться в межах 0,22–0,26. Тому можна вважати, що фактор форми пор практично не впливає на міцність керамічних зразків в межах температур випалу 1400–1600^{0}С.

Висновки

За результатами проведених досліджень можна зробити висновок, що евтектичні склади скла в псевдобінарних системах «кордієрит (Mg)–кордієрит (Mn)», «сподумен–кордієрит (Mn)», «евкриптит–кордієрит (Mn)» можуть бути використані як ефективні склозв'язки карбідокремнієвих дисперснозміцнених матеріалів.

Встановлено, що максимальними показниками міцності на стискання володіють керамічні зразки, які одержані з використанням склозв'язки Mg/Mn кордієритового складу. При цьому вирішальну роль у формуванні фізико-механічних показників відіграє температура спікання керамічних зразків. Так, максимальні показники міцності дослідної кераміки (в межах 400–450 МПа) спостерігаються після випалу при температурі 1400^{0}С.

Вплив температури спікання на властивості керамічних матеріалів обумовлений формуванням «коробчастої» структури в результаті перерозподілу склофази під час випалу та утворення щільної малопористої мікроструктури в приповерхневому шарі зразків при температурі 1400^{0}С. Пористість поверхневого шару зразків кераміки, спеченої при температурі 1600^{0}С, в 2–3 рази більше, ніж у зразків, спечених при температурі 1400^{0}С, що визначає суттєве зниження показника міцності на стискання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Ballistic* ceramics and analysis of their mechanical properties for armour applications: a review / Dresch A.B., Venturini J., Arcaro S., Montedo O.R.K., Bergmann C.P. // Ceram. Int. – 2021. – Vol.47. – No. 7. – P.8743-8761.

2. *A comparative* study on mechanical and ballistic performance of functionally graded Al6061 composites reinforced with B_4C, SiC, and Al_2O_3 / Karabulut S., Karakoc H., Bilgin M., Canpolat H., Krolczyk G.M., Sarэkaya M. // J. Mater. Res. Technol. – 2023. – Vol.23. – P.5050-5065.

3. *Sintering* behavior, microstructure and mechanical properties of silicon carbide ceramics containing different nano-TiN additive / Guo X., Yang H., Zhang L., Zhu X. // Ceram. Int. – 2010. – Vol.36. – No. 1. – P.161-165.

4. *Holand W., Beall G.H.* Glass-ceramic technology. 2nd ed. – Hoboken, NJ: Wiley, 2019. – 416 p.

5. *Glass* and glass-ceramic matrix composites for advanced applications: Part I: Properties and manufacturing technologies / Boccaccini D., Cannio M., Bernardo E., Boccaccini A.R. // Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses. – 2021. – Vol.2. – P.277-287.

6. *Crystallization*, structure and properties of $MgO–Al_2O_3–SiO_2$ highly crystalline transparent glass-ceramics nucleated by multiple nucleating agents / Han L., Song J., Lin C., Liu J., Liu T., Zhang Q., et al. // J. Eur. Ceram. Soc. – 2018. – Vol.38. – No. 13. – P.4533-4542.

7. *Ultra-high-frequency* radio-transparent ceramics of cordierite composition doped with $MgO–Al_2O_3–B_2O_3–SiO_2$ glass: synthesis, microstructure, thermal and physical properties / Zaichuk O.V., Amelina A.A., Hordieiev Y.S., Kalishenko Y.R. // Open Ceram. – 2023. – Vol.15. – Art. No. 100377.

8. *The utilization* of waste magnesite in the production of the cordierite ceramic / Askin A., Tatar I., Kilinc S., Tezel O. // Energy Procedia. – 2016. – Vol.107. – P.137-143.

9. *Effect* of B_2O_3 on the crystallization, structure and properties of $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ glass-ceramics / Luo W., Zhenhong B., Jiang W., Liu J., Feng G., Xua Y., et al. // Ceram. Int. – 2019. – Vol.45. – P.24750-24756.

10. *Аппен А.* Химия стекла. –Л.: Химия, 1974. – 351 с.

11. *Synthesis* and characteristic of celsian ceramics with the use of glass in the system $Li_2O-Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2$ / Zaichuk O.V., Amelina A.A., Hordieiev Yu.S., Kalishenko Y.R., Sribniak N.N. // Funct. Mater. – 2020. – Vol.27. – P.827-835.

12. *Patterns* in the synthesis processes, the microstructure and properties of strontium-anorthite ceramics modified by glass of spodumene composition / Zaichuk O., Amelina A., Hordieiev Y., Kalishenko Y., Sribniak N., Halushka S., et al. // East.-Eur. J. Enterprise Technol. – 2020. – Vol.6. – No. 108. – P.15-26.

13. *Venkateswaran C., Sreemoolanadhan H., Vaish R.* Lithium aluminosilicate (LAS) glass-ceramics: a review of recent progress // Int. Mater. Rev. – 2022. – Vol.67. – No. 6. – P. 620-657.

14. *Densely* sintered carbide-silicon ceramics on a glass-crystal binder of cordierite composition / Polozhaj S.G., Zaichuk O.V., Suhyy K.M., Polozhaj A.G. // Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii. – 2023. – No. 5. – P.98-105.

15. *Fusible* glass-crystalline binder in the spodumene–manganese cordierite system / Polozhaj S.G., Zaichuk O.V., Suhyy K.M., Polozhaj A.G. // Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii. – 2024. – No. 6. – P.117-122.

Надійшла до редакції 30.06.2026
Надійшла після виправлення 17.08.2026
Прийнята до публікації 18.09.2026
Опублікована 28.10.2026

SILICON CARBIDE DISPERSION-STRENGTHENED MATERIALS USING EUTECTIC GLASS BINDERS OF CORDIERITE AND SPODUMENE-CORDIERITE COMPOSITIONS

S.G. Polozhay *, O.V. Zaychuk, O.A. Amelina, A.G. Polozhay
Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine

* **e-mail: s.polozhaj@gmail.com**

This work is devoted to the development of silicon carbide ceramic compositions with glass-crystalline bonds in the (Li_2O, MgO, MnO)–Al_2O_3–SiO_2 system, as well as determining the characteristics of microstructure formation and phase composition of such ceramics in relation to their main physical and mechanical properties under low-temperature sintering conditions. The results of the study indicate that the eutectic glass compositions in the pseudobinary systems «cordierite (Mg)–cordierite (Mn),» «spodumene–cordierite (Mn),» and «eucryptite–cordierite (Mn)» can be used as effective glass binders in the low-temperature sintering of silicon carbide dispersion-strengthened materials. Maximum compressive strength values (in the range of 400–450 MPa) were achieved after firing at 1400^{0}C for ceramic materials produced using an Mg/Mn glass binder of cordierite composition. As a result, a «box-like structure» of silicon carbide ceramics is formed due to the redistribution of the glass phase during firing and the formation of a dense, low-porosity microstructure in the near-surface layer of the ceramic materials. Raising the sintering temperature of ceramics to 1600^{0}C results in a significant increase in the porosity of their surface layer (by a factor of 2–3). At the same time, the average equivalent pore size also increases by a factor of 1.5–2, while the number of pores decreases. This has a negative impact on the mechanical properties of the ceramics. Ceramic materials developed by firing at 1400^{0}C can be used as substitutes for relatively expensive high-alloy chromium- and manganese-containing alloys, which are used to line mining and beneficiation machinery and mechanisms operating during the processing of pulp or slurry under conditions of intense abrasive wear.

Keywords: silicon carbide ceramics; eutectic glass binders; cordierite; spodumene; phase composition; microstructure; physical and mechanical properties.

REFERENCES

1. Dresch AB, Venturini J, Arcaro S, Montedo ORK, Bergmann CP. Ballistic ceramics and analysis of their mechanical properties for armour applications: a review. *Ceram Int.* 2021; 47(7): 8743-8761. doi: 10.1016/j.ceramint.2020.12.095.

2. Karabulut S, Karakoc H, Bilgin M, Canpolat H, Krolczyk GM, Sarikaya M. A comparative study on mechanical and ballistic performance of functionally graded Al6061 composites reinforced with B_4C, SiC, and Al_2O_3. *J Mater Res Technol.* 2023; 23: 5050-5065. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.02.116.

3. Guo X, Yang H, Zhang L, Zhu X. Sintering behavior, microstructure and mechanical properties of silicon carbide ceramics containing different nano-TiN additive. *Ceram Int.* 2010; 36(1): 161-165. doi: 10.1016/j.ceramint.2009.07.013.

4. Holand W, Beall GH. *Glass-ceramic technology.* 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley; 2019. 416 p.

5. Boccaccini D, Cannio M, Bernardo E, Boccaccini AR. Glass and glass-ceramic matrix composites for advanced applications: Part I: properties and manufacturing technologies. *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*. 2021; 2: 277-287. doi: 10.1016/B978-0-12-818542-1.00079-5.

6. Han L, Song J, Lin C, Liu J, Liu T, Zhang Q, et al. Crystallization, structure and properties of $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ highly crystalline transparent glass-ceramics nucleated by multiple nucleating agents. *J Eur Ceram Soc*. 2018; 38(13): 4533-4542. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.05.025.

7. Zaichuk AV, Amelina AA, Hordieiev YS, Kalishenko YR. Ultra-high-frequency radio-transparent ceramics of cordierite composition doped with $MgO-Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2$ glass: synthesis, microstructure, thermal and physical properties. *Open Ceram*. 2023; 15: 100377. doi: 10.1016/j.oceram.2023.100377.

8. Askin A, Tatar I, Kilinc S, Tezel O. The utilization of waste magnesite in the production of the cordierite ceramic. *Energy Procedia*. 2016; 107: 137-143. doi: 10.1016/j.egypro.2016.12.151.

9. Luo W, Zhenhong B, Jiang W, Liu J, Feng G, Xua Y, et al. Effect of B_2O_3 on the crystallization, structure and properties of $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ glass-ceramics. *Ceram Int*. 2019; 45: 24750-24756. doi: 10.1016/j.ceramint.2019.08.215.

10. Appen A. *Khimiya stekla* [Chemistry of glass]. Leningrad: Khimiya; 1974. 351 p. (*in Russian*).

11. Zaichuk AV, Amelina AA, Hordieiev YuS, Kalishenko YR, Sribniak NN. Synthesis and characteristic of celsian ceramics with the use of glass in the system $Li_2O-Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2$. *Funct Mater*. 2020; 27: 827-835. doi: 10.15407/fm27.04.827.

12. Zaichuk O, Amelina A, Hordieiev Y, Kalishenko Y, Sribniak N, Halushka S, et al. Patterns in the synthesis processes, the microstructure and properties of strontium-anorthite ceramics modified by glass of spodumene composition. *East Eur J Enterprise Technol*. 2020; 6(108): 15-26. doi: 10.15587/1729-4061.2020.216754.

13. Venkateswaran C, Sreemoolanadhan H, Vaish R. Lithium aluminosilicate (LAS) glass-ceramics: a review of recent progress. *Int Mater Rev*. 2022; 67(6): 620-657. doi: 10.1080/09506608.2021.1994108.

14. Polozhaj S, Zaichuk O, Suhyy K, Polozhaj A. Densely sintered carbide-silicon ceramics on a glass-crystal binder of cordierite composition. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2023; (5): 98-105. doi: 10.32434/0321-4095-2023-150-5-98-105.

15. Polozhaj SG, Zaichuk OV, Polozhaj AG. Fusible glass-crystalline binder in the spodumene–manganese cordierite system. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2024; (6): 117-122. doi: 10.32434/0321-4095-2024-157-6-117-122.