

УДК 621.921.27:661.665.1

*В.В. Пісчанська^а, М.В. Губинський^а, А.Ю. Усенко^а, А.В. Сибір^а, К.М. Сухий^б,
С.С. Федоров^а*

ЕЛЕКТРОПРОВІДНИЙ КОМПОЗИЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ НА ОСНОВІ СИЛІЦІЙ КАРБІДУ

^а Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна

^б ДВНЗ Український державний хіміко-технологічний університет, м. Дніпро, Україна

Наведено результати досліджень, спрямованих на визначення основних технологічних параметрів при одержанні електропровідного композиційного матеріалу, який містить силіцій карбід, графіт, глиноземистий цемент і рідке скло. Цей композитний матеріал може бути використаний як нагрівальний елемент для теплових акумуляторів в інтервалі температур експлуатації 600–1000°C. Досліджено вплив кількості рідкого скла в межах 12–18 мас.% і тиску пресування в інтервалі 40–70 Н/мм² на змінення показників властивостей зразків після сушіння. Встановлено, що досягнення механічної міцності зразків 34,2 Н/мм² і 33,4 Н/мм² забезпечується при тиску пресування 60 Н/мм² і 50 Н/мм² і вмісті рідкого скла в масі 14 мас.% і 16 мас.%, відповідно. Доведено, що в процесі випалу зразків при температурах 600–1000°C унаслідок фізико-хімічних процесів перетворення рідкого скла та його взаємодії з глиноземистим цементом формується пориста мікроструктура композиту, яка характеризується відкритою пористістю в діапазоні 23,14–25,11% і механічною міцністю в межах 33,2–32,0 Н/мм². Одержаний композиційний матеріал після випалу при 1000°C в інтервалі значень сили струму 28–94 А і напруги в межах 19,2–13,2 В характеризувався питомим електричним опором в діапазоні $0,067 \cdot 10^{-2}$ – $0,014 \cdot 10^{-2}$ Ом·м.

Ключові слова: силіцій карбід, графіт, глиноземистий цемент, рідке скло, тиск пресування, відкрита пористість, механічна міцність, мікроструктура, питомий електричний опір.

DOI: 10.32434/0321-4095-2020-133-6-151-157

Вступ

На даний час значного розвитку зазнала галузь виробництва електронагрівальних елементів, пристроїв і покриттів різного функціонального призначення на основі електропровідних неметалевих композиційних матеріалів. Для виготовлення елементів різної електричної потужності з температурами експлуатації до 1500°C, призначених для обігріву об'єктів будівельної та хімічної промисловості, комунального та сільського господарства, використовують електропровідні бетони (загальна назва – Бетел) [1]. Ці бетони становлять собою гетерогенні системи, що містять електропровідний вуглецевий матеріал (кокс, природний графіт, сажа, вуглецеве волокно, нанотрубки) [2–4], комбінації різних видів діелектричних заповнювачів (квар-

цовий пісок, шамот, шлаки металургійного виробництва) [1], в'язучих (портландцемент, глиноземистий цемент, доменний шлак) [1], органічних і неорганічних зв'язок (фенол-формальдегідні, фосфатні, рідке скло, твердий силікат натрію) [1,3,5], отверджувачі (натрій гексафлуорсилікат, металургійні шлаки) [1,2]. Для високотемпературного нагрівання до 1200–1600°C в електронагрівальних пристроях і промислових електричних печах у металургії і машинобудуванні, у виробництві кераміки, скла та у багатьох теплових агрегатах різних галузей промисловості використовують карбідкремнієві нагрівачі, які характеризуються високою теплопровідністю та термостійкістю, низьким температурним коефіцієнтом лінійного розширення, хімічною стабільністю до дії високих температур і агресив-

ного середовища [1,6].

Зважаючи на те, що силіцій карбід і вуглецеві матеріали, характеризуються високою електричною провідністю і теплопровідністю [7,8], становить практичний і науковий інтерес поєднання їх електротехнічних властивостей і виготовлення неметалевих композиційних матеріалів із максимальною температурою експлуатації 1000°C.

Практичне використання неметалевих композиційних матеріалів з температурою експлуатації 600–1000°C доцільно при створенні твердотільних теплових акумуляторів [9], які використовуються з метою зменшення витрат на опалення за рахунок зменшення тарифів на електричну енергію у нічний та денний час. Для аналогічної мети можуть бути використані і композитні адсорбційні матеріали типу «сіль в пористій матриці», які експлуатуються в інтервалі температур 30–100°C [10], зокрема, для акумуляування теплової енергії [11], а також регенерації низько-потенційної теплоти та вологи [12,13].

Узагальнюючи практичний досвід технології виготовлення Бетелів, жаростійких бетонів, вогнетривких виробів і неформованих матеріалів [14,15], у тому числі електропровідних, обрано систему «силіцій карбід–глиноземистий цемент–графіт», а як зв'язку – рідке скло, яке характеризується високими адгезійними властивостями до складових мінеральної композиції та графіту [3,5].

Здійснені дослідження ставили за мету визначення впливу основних технологічних параметрів: тиску пресування та вмісту рідкого скла в масі, температури термічного оброблення на фізико-механічні властивості композиційного матеріалу на основі силіцій карбиду для створення нагрівального елемента з низьким питомим електричним опором в інтервалі температур експлуатації 600–1000°C.

Методика експерименту

Як мінеральні складові композиційних матеріалів використовували силіцій карбід чорний марки 54С різної зернистості (ТУ У 3-02-00222226-016-96, ПАТ «Запорізький абразивний комбінат»), графіт елементний очищений марки ГЭО-97 (ТОВ «Завальєвський графіт», Україна), глиноземистий цемент марки «Secar-38R» («Kerneos», Франція), скло рідке натрієве (ГОСТ 13078-81) з густиною 1,45–1,50 (фактично 1,41 г/см³), силікатний модуль 2,8–3,0 (фактично 2,93), отверджувач – натрій гексафлуорсилікат Na₂SiF₆ (ТУ 2621-010-69886968-2013).

Приготування мас для формування експе-

риментальних зразків здійснювали із сумішей, зерновий склад яких розраховано за рівнянням Андреасена для n=0,27 [14]:

$$Y_i = \left(\frac{d_i}{D} \right)^n \cdot 100,$$

де Y_i – загальний вміст фракції з розміром, меншим d_i; D – максимальний розмір зерна в суміші, мм; n – показник ступеню, який залежить від форми зерен, їх взаємного зчеплення, умов упаковки суміші.

Композиційні суміші склалися із 51 мас. % дрібнозернистого силіцій карбиду фракції 1,200–0,063 мм із певним співвідношенням вузьких фракцій, 49 мас. % суміші спільного помелу силіцій карбиду, глиноземистого цементу і графіту у співвідношенні 2,7:1,0:1,2. Приготування тонкодисперсного силіцій карбиду здійснювали у вібраційному млині (співвідношення маси матеріалу і помольних тіл 1:3) протягом 90 хв (залишок на ситі №0063 – 0,2%); суміші спільного помелу силіцій карбиду з розміром часток менше 0,063 мм, графіту та цементу виконували у вібраційному стирачі протягом 3 хв. Для приготування маси використовували рідке скло (понад 100%) та отверджувач Na₂SiF₆ у кількості 10 мас. % від маси зв'язки (понад 100%) [1]. Формування зразків-циліндрів діаметром 25 мм здійснювали на лабораторному гідравлічному пресі в інтервалі значень тиску пресування 40–70 Н/мм². Сформовані зразки зберігали на повітрі протягом трьох діб для набору міцності [1], сушили і випалювали у муфельній печі в засипці (суміш кварцового піску і коксу з розміром часток менше 1 мм) при температурі 600°C, 800°C і 1000°C з витримання 3 год. Фізико-механічні властивості зразків (уявну щільність, відкриту пористість, межу міцності при стиску) визначали за стандартними методиками згідно з діючими ДСТУ. Для вимірювання вольт-амперних характеристик використовували стенд, що складався з лабораторного автотрансформатора ЛАТР-40А, вимірювальних кліщів ЕХТЕСН 382068 і вольтметра, та визначали величину питомого опору зразка діаметром 10 мм і довжиною 100 мм (довжина струмопровідної частини зразка 80 мм).

Фізико-хімічні процеси, що протікають при нагріванні композицій, які містять цемент, рідке скло та отверджувач, досліджували з використанням диференційно-термічного аналізу (дериатограф системи F. Paulik, J. Paulik, L. Erdey Q-1500D) та рентгенофазового аналізу (дифрак-

мометр ДРОН-3). Мікроструктуру експериментальних зразків після сушіння та випалу досліджували за допомогою растрового електронного мікроскопу «РЭМ-106И».

Результати та обговорення

Для визначення характеру перетворень у композиціях «рідке скло+ Na_2SiF_6 » і «цемент+рідке скло+ Na_2SiF_6 » проведено диференційно-термічний аналіз (рис. 1).

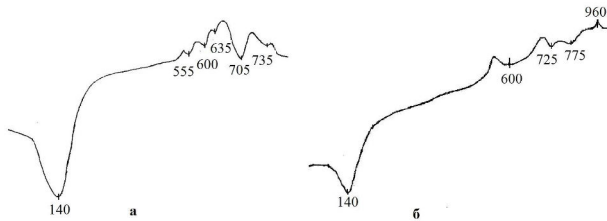


Рис. 1. Криві диференційно-термічного аналізу композицій: а – «рідке скло+ Na_2SiF_6 »; б – «цемент+рідке скло+ Na_2SiF_6 »

На термограмі композиції «рідке скло+ Na_2SiF_6 » (рис. 1,а) ендоефект значної інтенсивності з максимумом при 140°C відповідає виділенню основної кількості адсорбційної воло-

ги та уповільненому зневодненню гелю кремневої кислоти. Низка ендоефектів різної інтенсивності з максимумами при 555 , 600 , 635 , 705 і 735°C пов'язано з процесами полімеризації кремнекисневих тетраедрів. На термограмі проби композиції «цемент+рідке скло+ Na_2SiF_6 » (рис. 1,б) зберігається ендоефект із максимумом при 140°C , ендоефект із максимумом при 600°C має пологий характер, що вірогідно, пов'язано з хімічною взаємодією складових композиції. Неглибокі ендоефекти з максимумами при 725 і 775°C свідчать про те, що основні процеси полімеризації зв'язки проходять при більш високих температурах. Екзоетфект з максимумом при 960°C пов'язаний із утворенням нових сполук при взаємодії мінералів цементу і зв'язки.

Рентгенофазовий аналіз проб композиції «цемент+рідке скло+ Na_2SiF_6 » виконували після термічного оброблення при 140 , 600 і 1000°C та вихідної проби глиноземистого цементу (рис. 2).

Аналіз дифрактограми цементу (рис. 2,а) показав, що основною мінералогічною фазою є моноалюмінат кальцію $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, якому відповідають дифракційні максимуми високої ($d\cdot 10^{-10}=2,96$ м), середньої ($d\cdot 10^{-10}=4,67$; $4,37$;

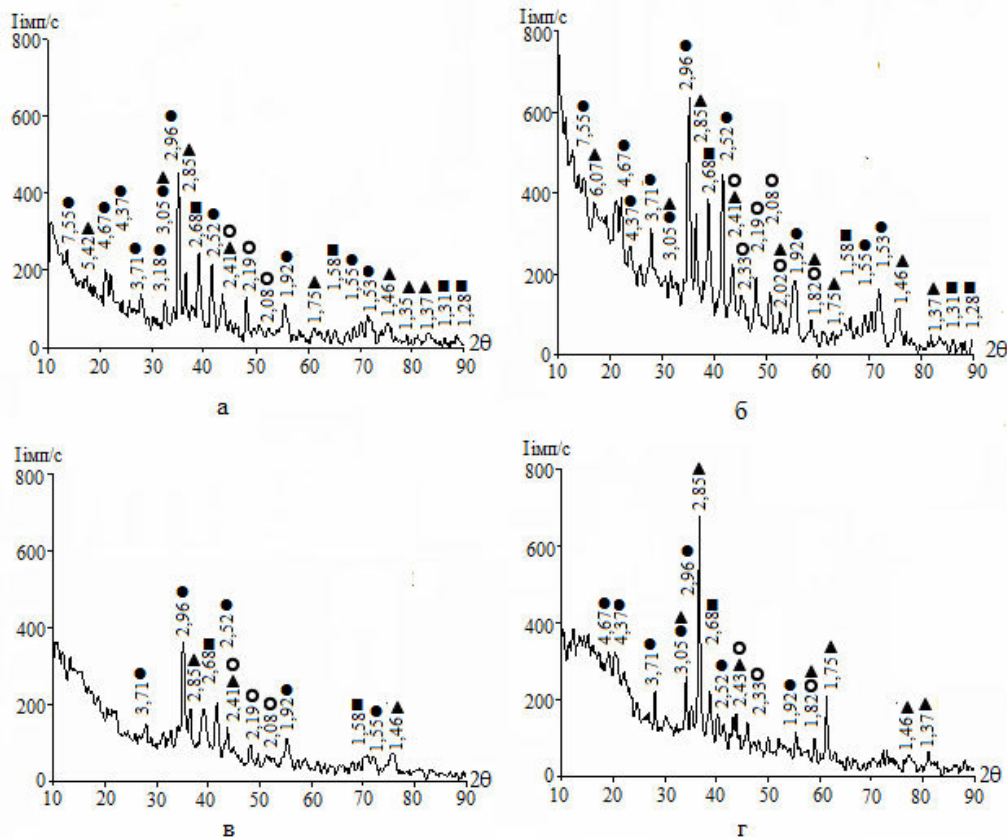


Рис. 2. Дифрактограми: а – цемент; б, в, г – композиція «цемент+рідке скло+ Na_2SiF_6 »; температура термооброблення б – 140°C ; в – 600°C ; г – 1000°C ; ● – $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$; ▲ – $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$; ○ – $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$; ■ – $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$

2,52; 1,92 м) та низької ($d \cdot 10^{-10} = 7,55; 3,71; 3,18; 1,55; 1,53$ м) інтенсивності. Силікати кальцію представлені геленітом $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ($d \cdot 10^{-10} = 2,85; 5,42; 1,75; 1,46; 1,35; 1,37$ м) і двокальцієвим силікатом $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ($d \cdot 10^{-10} = 2,08; 2,19$ м), а рефлекси середньої та низької інтенсивності ($d \cdot 10^{-10} = 2,68; 1,58; 1,75; 1,31; 1,28$ м) відповідають чотирикальцієвому алюмофериту $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$. Для дифрактограми проби композиції «цемент+рідке скло+ Na_2SiF_6 » після сушки при 140°C (рис. 2,б) характерно підвищення інтенсивності рефлексів основних кристалічних фаз глиноземистого цементу (рис. 2,а) та поява нових дифракційних максимумів $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ($d \cdot 10^{-10} = 6,07$ м), $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ($d \cdot 10^{-10} = 2,33$ м) і рефлексів ($d \cdot 10^{-10} = 1,82; 2,02$ м), що одночасно належить $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ і $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. Значно змінюється дифракційна картина проби композиції після випалу при 600°C (рис. 2,в), а саме, знижується інтенсивність дифракційних максимумів $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ($d \cdot 10^{-10} = 3,71; 2,96; 2,52; 1,92$ м), зникають рефлекси $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ та $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ у малокутовій ділянці ($2\theta = 10^\circ - 30^\circ$) і в діапазоні кутів $2\theta = 58^\circ - 65^\circ$ та $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ($2\theta = 85^\circ - 89^\circ$), що свідчить про зростання аморфної фази в композиції. Характер зміння інтенсивності дифракційних максимумів композиції після випалу при 1000°C (рис. 2,г) вказує на зростання кількості $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ при одночасному зменшенні вмісту $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. Порівняння інтенсивності рефлексів цих мінералів у пробах композиції після сушки при 140°C (рис. 2,б) і після випалу при 1000°C (рис. 2,г) вказує на значне зниження інтенсивності дифракційних максимумів $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ($d \cdot 10^{-10} = 3,71; 2,96; 2,52; 1,92$ м) та зростання інтенсивності рефлексів $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ($d \cdot 10^{-10} = 2,85; 1,75$ м), $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ та $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ($d \cdot 10^{-10} = 3,05$ м).

З метою встановлення оптимальної кількості рідкого скла для створення умов його гомогенного розподілу в полідисперсній композиційній суміші у взаємозв'язку з величиною тиску пресування зразків варіювали вміст рідкого скла у масі і тиску пресування та визначали їх вплив на уявну густину зразків після формування (сирець), відкриту пористість та межу міцності при стиску зразків після сушіння при 140°C (рис. 3).

Як видно з отриманих залежностей (рис. 3,а) для маси, що містить мінімальну кількість зв'язки (12 мас.%), підвищення тиску пресування сприяє покращенню ущільнення маси і зростанню уявної густини зразків із $2,52$ г/см³ до $2,60$ г/см³. Загальний характер зміння уявної густини зразків сформованих із мас, що містять 14–18 мас.% рідкого скла, вказує на наявність на кривих максимуму, що відповідає певному значенню тиску пресування, вище і нижче якого ущільнення маси погіршується і уявна щільність знижується. Це пояснюється тим, що зростання кількості зв'язки сприяє зменшенню сил тертя частинок маси і забезпечує покращення ущільнення маси при формуванні, а з підвищенням тиску пресування зростання товщини прошарків рідкого скла між частинками призводить до видавлювання зв'язки у пори і спричиняє пружне розширення в об'ємі зразка після зняття зусилля пресування і, як наслідок, призводить до утворення внутрішніх мікротріщин [15]. Результати визначення відкритої пористості та межі міцності при стиску зразків після сушіння при 140°C (рис. 3,б,в) узгоджуються зі встановленими закономірностями зміння уявної густини зразків і свідчать про те, що недостатня кількість зв'язки (12 мас.%), так само як і її надлишок (18 мас.%), не забезпечують формування щільних і міцних контактів між частинками маси, і не забезпечують необхідного зміцнення зразків у

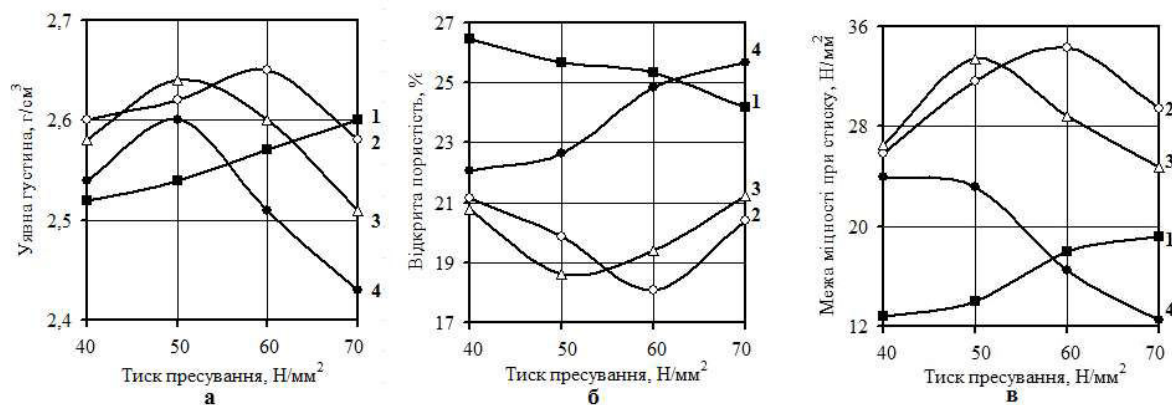


Рис. 3. Залежність уявної щільності сирцю (а), відкритої пористості (б) і межі міцності при стиску (в) зразків після сушки від тиску пресування мас із вмістом рідкого скла, мас. %: 1 – 12; 2 – 14; 3 – 16; 4 – 18

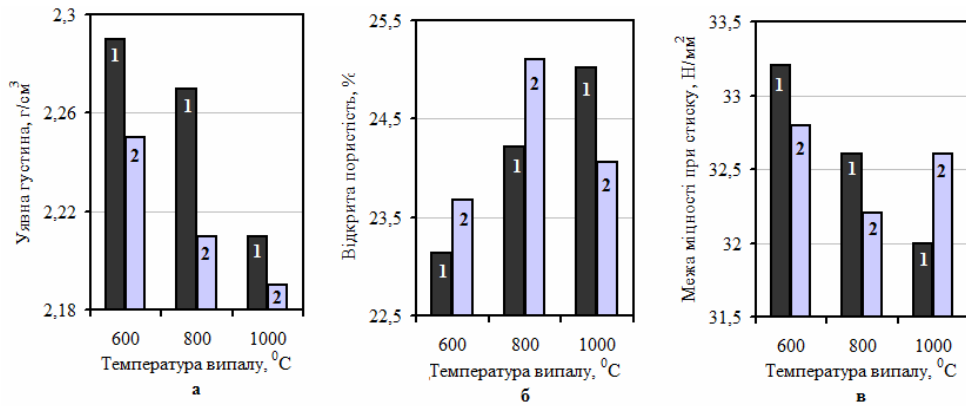


Рис. 4. Вплив температури випалу на показники властивостей зразків: уявна щільність (а); відкрита пористість (б); межа міцності при стиску (в); 1 – вміст рідкого скла 14 мас.%, тиск пресування 60 Н/мм²; 2 – вміст рідкого скла 16 мас.%, тиск пресування 50 Н/мм²

процесі сушіння. За отриманими даними визначено оптимальне поєднання кількості рідкого скла в масі – 14 мас.% і 16 мас.% та тиску пресування – 60 Н/мм² і 50 Н/мм², що забезпечує досягнення мінімальної відкритої пористості зразків після сушки 18,09% і 18,62% та механічної міцності 34,2 Н/мм² і 33,4 Н/мм², відповідно. У подальшому визначали змінення показників властивостей зразків в залежності від температури випалу 600, 800 і 1000°C (рис. 4), яка відповідала основним фізико-хімічним процесам взаємодії цементу і рідкого скла (рис. 1,2).

Наведені дані вказують на загальну тенденцію зниження уявної густини та підвищення відкритої пористості зразків при нагріванні, що обумовлено фізико-хімічними процесами перетворень рідкого скла та його взаємодією з глиноземистим цементом і, як наслідок, структурно-фазовими зміненнями у композиційному матеріалі. Так, зростання температури випалу супроводжувалося зниженням уявної густини зразків у межах 2,29–2,21 г/см³ і 2,25–2,19 г/см³, причому для зразків, що містять 14 мас.% рідкого скла спостерігалось підвищення відкритої пористості з 23,14% до 25,02% та зниження механічної міцності з 33,2 Н/мм² до 32 Н/мм². Підвищення вмісту рідкого скла (16 мас.%) у масі зразків, обумовило більш високі значення відкритої пористості: 23,68% і 25,11% після випалу при 600°C і 800°C. Однак, при випалі при 1000°C відкрита пористість зразків знижується з 25,11% до 24,06%, а механічна міцність незначно зростає до 32,2 Н/мм².

Отже, на підставі отриманих даних щодо змінення показників властивостей зразків після випалу можна стверджувати, що вміст рідкого скла в масі 14 мас.% і 16 мас.% та тиск пресування 60 Н/мм² і 50 Н/мм² сприяють досягнен-

ню стабільного рівня визначальних показників властивостей зразків у інтервалі температур випалу 600–1000°C у наступних межах: відкрита пористість 23,14–25,11%, межа міцності при стиску 33,2–32,0 Н/мм².

Дослідження мікроструктури композиційного матеріалу виконували на зразках, що містять 16 мас.% рідкого скла і сформовані при тиску пресування 50 Н/мм², після сушіння при 140°C (рис. 5) і випалу при 1000°C (рис. 6).

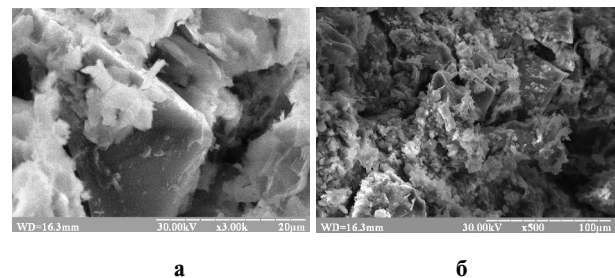


Рис. 5. Мікроструктура зламу зразка після сушіння при 140°C

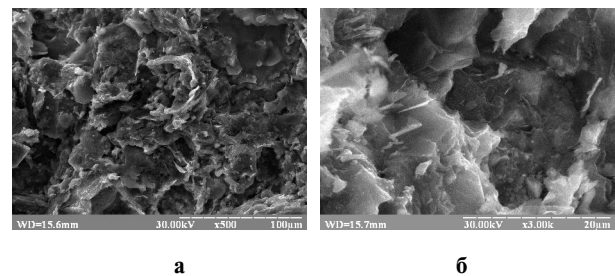


Рис. 6. Мікроструктура зламу зразка після випалу при 1000°C

Характер морфології рельєфу поверхні зламу зразка після сушіння (рис. 5) свідчить про те, що руйнування зразка відбувалось за зв'язуючою речовиною надано сумішшю дисперсних часток розміром менше 75–60 мкм, які зв'язані

між собою гелем кремнієвої кислоти. У мікрос-структурі зламу виділяються дрібні капілярні пори товщиною 8–20 мкм утворення яких, вірогідно пов'язано із видалення при сушці адсорбційної вологи та зневодненням рідкого скла. Відмічено наявність закритих пор сферичної та овальної форми розміром 150–100 мкм і 50–25 мкм. Деякі зерна силіцій карбиду розміром 200–65 мкм ізольовані один від одного прошарками зв'язуючої речовини, яка не утворює щільного суцільного контакту між частинками (рис. 5,б).

Високотемпературний випал зразка приводить до змінення морфології поверхні зламу (рис. 6), яка відрізняється заглибленнями та більш чіткою кристалографічною огранкою зерен розміром 100–20 мкм, які спечені у пористий конгломерат. Пори мають різну конфігурацію і розмір: дрібні – сферичні й овальні розміром від 10 мкм до 40 мкм, і переважно розташовані у зв'язуючій речовині, крупні пори, утворені в результаті процесів коалесценції дрібних пор при випалі, мають розмір від 110 мкм до 60 мкм. Поверхня зламу зразка і внутрішня поверхня пор покриті аморфною речовиною. Порівняння мікросструктури зламу зразка після сушіння і випалу вказує на формування в умовах високо-температурного випалу більш рівномірної пористої структури композиту зі спеченими щільними прошарками у міжпоровому просторі.

Визначення електропровідних властивостей зразка після випалу при 1000°C протягом 10 циклів випробувань в інтервалі значень сили струму 28–94 А виявило закономірне для напівпровідників зниження напруги в межах 19,2–13,2 В і зменшення величини питомого опору в діапазоні $0,067 \cdot 10^{-2}$ – $0,014 \cdot 10^{-2}$ Ом·м. Причому відносне змінення питомого опору після 10 циклів складало 0,01–0,05%, що свідчить про стабільність електротехнічних властивостей електропровідного композиційного матеріалу.

Висновки

Показана можливість одержання електро-провідного композиційного матеріалу на основі силіцій карбиду, який містить, глиноземистий цемент і графіт, а як зв'язки – рідке скло, та досліджено вплив основних технологічних параметрів на фізико-технічні показники властивостей композиту. Встановлено оптимальне співвідношення вмісту рідкого скла у складі композиційної суміші та тиску пресування, що забезпечує ефективне ущільнення маси, і як наслідок, сприяє формуванню в умовах термічного нагрівання мікросструктури композиту зі стабільними показниками властивостей та низьким

питомим опором. Результати досліджень можуть бути використані для виготовлення нагрівального елемента з температур експлуатації в інтервалі 600–1000°C.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Горелов С.В., Горелов В.В., Ивановский А.Л. Резисторы в схемах электротеплоснабжения: водный транспорт. – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2016. – 423 с.
2. *Большаков В.И., Савицкий Н.В.* Электропроводящие нанокompозиты для систем диагностики технического состояния герметизирующих оболочек АЭС // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. – 2016. – № 5(218) – С.16-34.
3. *Электропроводящая композиция бетона / Денисюк И.Ю., Успенская М.В., Фокина М.И., Логушкова К.Ю.* // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2018. – Т.18. – № 1. – С.158-162.
4. *Yoo D.-Y., You I., Lee S.-J.* Electrical properties of cement-based composites with carbon nanotubes, graphene, and graphite nanofibers // *Sensors*. – 2017. – Vol.17. – Article No. 1064.
5. *Исследование теплозащитных свойств композитного материала жидкое стекло–микрочастицы графита / Гостев В.А., Питухин Е.А., Устинов А.С., Яковлева Д.А.* // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2014. – Т.14. – № 3. – С.81-87.
6. *Литовченко С.В.* Высокотемпературные силициды: свойства и применение // *Східно-Європейський фізичний журнал*. – 2016. – Т.3. – № 3. – С.4-24.
7. *Карбид кремния: технология, свойства, применение / Агеев О.А., Беляев А.Е., Болтовец Н.С. и др.* – Харьков: «ИСМА», 2010. – 532 с.
8. *Лакомский В.И.* Электрическое сопротивление твердых углеродных материалов // *УглеХимический журнал*. – 2013. – № 1-2. – С.65-69.
9. *Патент на корисну модель, UA (11)139757.* Акумулятор теплової енергії / Губинський М.В., Усенко А.Ю., Пінчук В.О., Шишко Ю.В., Федоров С.С., Форись С.М. – Національна металургійна академія України. Опубл. 27.01.2020.
10. *The study of properties of composite adsorptive materials «silica gel–crystalline hydrate» for heat storage devices / Sukhyy K., Belyanovskaya E., Kovalenko V., Kotok V., Sukhyy M., Kolomiyets E., Gubynskyi M., Yeromin O., Prokopenko O.* // *East. Eur. J. Enterprise Technol.* – 2018. – Vol.91. – No. 1. – P.52-58.
11. *Operating regime of adsorptive heat-moisture regenerators based on composites “silica gel–sodium sulphate” and “silica gel–sodium acetate” / Belyanovskaya E.A., Lytovchenko R.D., Sukhyy K.M., Yeremin O.O., Sukha I.V., Prokopenko E.M.* // *J. Chem. Chem. Technol.* – 2019. – Vol.27.

– No. 2. – P.158-168.

12. *Технологія* регенерації низькопотенційного тепла та вологи композитним сорбентом «силікагель/натрій сульфат» / Коломієць О.В., Сухий К.М., Беляновська О.А., Томіло В.І., Сухий М.П. // *Вопр. химии и хим. технол.* – 2016. – № 5-6. – С.68-73.

13. *Огнеупоры* для промышленных агрегатов и топков: Справочное издание в двух книгах. – Кн. 1 Производство огнеупоров / Кашеев И.Д., Алфеева В.Г., Ладыгичев М.Г. и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 2000. – 663 с.

14. *Пивинский Ю.Е.* Неформованные огнеупоры: справоч. изд. в двух томах. – Т.1 Общие вопросы технологии. – М.: Теплоэнергетик, 2005. – 448 с.

15. *Попильский Р.Я., Пивинский Ю.Е.* Прессование порошковых керамических масс. – М.: Metallurgiya, 1983. – 176 с.

Надійшла до редакції 28.09.2020

ELECTRICALLY CONDUCTIVE COMPOSITE MATERIAL BASED ON SILICON CARBIDE

V.V. Pischanskaya ^a, M.V. Hubytskyi ^{a, *}, A.Yu. Usenko ^a, A.V. Sybir ^a, K.M. Sukhyy ^b, S.S. Fedorov ^a

^a National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine

^b Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

* e-mail: gubinm@tmec.com.ua

The article presents the results of the study aimed at establishing the main process parameters of the preparation of an electrically conductive composite material containing silicon carbide, graphite, aluminous cement and sodium silicate. This composite material can be used as a heating element in heat accumulators for the operating temperature range of 600–1000°C. The effects of the amount of sodium silicate within the range of 12–18 wt.% and the compacting pressure within the range of 40–70 N/mm² on the changes in the properties of the samples after drying were investigated. It was established that the mechanical strength of the samples of 34.2 N mm⁻² and 33.4 N mm⁻² can be achieved at the compacting pressure of 60 N mm⁻² and 50 N mm⁻² and the sodium silicate content of 14 wt.% and 16 wt.%, respectively. It was shown that a porous microstructure of the composite is formed in the course of samples annealing at the temperatures of 600–1000°C due to physicochemical processes of transformations of sodium silicate and its interaction with aluminous cement; this porous microstructure is characterized by open porosity in the range of 23.14–25.11% and mechanical strength in the range of 33.2–32.0 N mm⁻². The fabricated composite material after its annealing at 1000°C shows a low electrical resistivity of 0.067·10⁻²–0.014·10⁻² Ohm·m at the electric current of 28–94 A and the voltage of 19.2–13.2 V.

Keywords: silicon carbide; graphite; alumina cement; sodium silicate; compacting pressure; open porosity; mechanical strength; microstructure; electrical resistivity.

REFERENCES

- Gorelov S.V., Gorelov V.V., Ivanovskii A.L., *Rezistory v skhemakh elektrotroplosnabzheniya: vodnyi transport* [Resistors in circuitries of electric and heat supply: water transport]. Direkt-Media Publishers, Moscow-Berlin, 2016. 423 p. (in Russian).
- Bol'shakov V.I., Savitskii N.V. Eelektroprovodyashchie nanokompozity dl'ya system diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya germetiziruyushchikh obolochek AJeS [Electrically conductive nanocomposites for the systems of diagnostics of the technical state of sealing claddings]. *Visnyk Prydniprovskoyi Derzhavnoyi Akademii Budivnytszta ta Arkhitektury*, 2016, no. 5(218), pp. 16-34. (in Ukrainian).
- Denisyuk I.Yu., Uspenskaya M.V., Fokina M.I., Logushkova K.Yu. Elektroprovodyashchaya kompozitsiya betona [Conductive concrete composition]. *Nauchno-Tekhnicheskii Vestnik Informatsionnykh Tekhnologii, Mekhaniki i Optiki*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 158-162. (in Russian).
- Yoo D.-Y., You I., Lee S.-J. Electrical properties of cement-based composites with carbon nanotubes, graphene, and graphite nanofibers. *Sensors*, 2017, vol. 17, article no. 1064.
- Gostev V.A., Pituhin E.A., Ustinov A.S., Yakovleva D.A. Issledovanie teplozashchitnykh svoystv kompozitnogo materiala zhidkoe steklo–mikrochastitsy grafitu [Research into the thermal insulation properties of the composite materials glass–graphite microparticles]. *Nauchno-Tekhnicheskii Vestnik Informatsionnykh Tehnologii, Mekhaniki i Optiki*, 2014, vol. 14, no. 3, pp. 81-87. (in Russian).
- Litovchenko S.V. Vysokotemperaturnye silitsidy: svoystva i primeneniye [High-temperature silicides: properties and application]. *East European Journal of Physics*, 2016, vol. 3, no. 3, pp. 4-24. (in Russian).
- Ageev O.A., Beljaev A.E., Boltovets N.S., *Karbid kremniya: tekhnologiya, svoystva, primeneniye* [Silicon carbide: technology, properties and application]. YSMA Publishers, Kharkiv, 2010. 532 p. (in Russian).
- Lakomskii V.I. Eelektricheskoe soprotivleniye tverdykh uglerodnykh materialov [Electrical resistance of solid carbon material]. *UgleKhimicheskii Zhurnal*, 2013, no. 1-2, pp. 65-69. (in Russian).
- Gubinsky M.V., Usenko A.Yu., Pinchuk V.O., Shishko Yu.V., Fedorov S.S., Foris S.M., *Thermal energy accumulator*. Patent UA, no. 139757, 2020. (in Ukrainian).
- Sukhyy K., Belyanovskaya E., Kovalenko V., Kotok V., Sukhyy M., Kolomiyets E., Gubynskyi M., Yeromin O., Prokopenko O. The study of properties of composite adsorptive materials «silica gel–crystalline hydrate» for heat storage devices. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, vol. 91, pp. 52-58.
- Belyanovskaya E.A., Lytovchenko R.D., Sukhyy K.M., Yeremin O.O., Sukha I.V., Prokopenko E.M. Operating regime of adsorptive heat-moisture regenerators based on composites «silica gel–sodium sulphate» and «silica gel–sodium acetate». *Journal of Chemistry and Chemical Technology*, 2019, vol. 27, no. 2, pp. 158-168.
- Kolomiyets E.V., Sukhyy K.M., Belyanovskaya E.A., Tomilo V.I., Sukhyy M.P. Technology of the regeneration of low-potential heat and moisture by means of the composite sorbent «silica gel/sodium sulfate». *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 2016, no. 5-6, pp. 68-73.
- Kascheev I.D., Alfeeva V.G., Ladygichev M.G., *Ogneupory dl'ya promyshlennykh agregatov i topok. Kniga 1: proizvodstvo ogneuporov* [Refractories for industrial units and furnaces, vol. 1: refractory production]. Intermet Inzhiniring Publishers, Moscow, 2000. 663 p. (in Russian).
- Pivinskii Yu.E., *Neformovannyye ogneupory. Tom 1. Obshchie voprosy tekhnologii* [Unshaped refractories, vol. 1: general issues of technology]. Teploenergetik Publishers, Moscow, 2005. 448 p. (in Russian).
- Popil'skii R.Ya., Pivinskii Yu.E., *Pressovanie poroshkovykh keramicheskikh mass* [Compression of powdered ceramic masses]. Metallurgiya Publishers, Moscow, 1983. 176 p. (in Russian).