

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКА ДЕРЖАВНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ**

КАРПЕНКО ГАННА ВОЛОДИМИРІВНА



УДК 661.66:677.5:621.52

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ
НИЗЬКОЩІЛЬНИХ ВУГЛЕЦЕВИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ
ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРОВАКУУМНОГО ОБЛАДНАННЯ**

Спеціальність 05.02.01 – матеріалознавство

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Херсон - 2017

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Запорізькій державній інженерній академії Міністерства освіти і науки України, м. Запоріжжя

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент

Скачков Віктор Олексійович,

Запорізька державна інженерна академія,
доцент кафедри металургії

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,

Савуляк Валерій Іванович,

Вінницький національний технічний університет
завідувач кафедри технології підвищення
зносостійкості

кандидат технічних наук

Браїло Микола Володимирович

Херсонська державна морська академія,
доцент кафедри транспортних технологій

Захист відбудеться "29" вересня 2017 року о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 67.111.01 при Херсонській державній морській академії за адресою: 73000, м. Херсон, проспект Ушакова, 20.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Херсонської державної морської академії за адресою: 73000, м. Херсон, проспект Ушакова, 42.

Автореферат розіслано "28" серпня 2017 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради К 67.111.01,
кандидат технічних наук



О.О. Сапронов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Виробництво вуглецевих композиційних матеріалів є одним з найбільш пріоритетних напрямків у техніку й технології. Основними споживачами виробів цього класу матеріалів є металургія, хімічна промисловість, космічні технології та атомна енергетика.

Засновниками науки про вуглецеві композиційні матеріали є такі вчені, як Гурін В.А. (Україна), Вішняков Л.Р. (Україна), Санін Ф.П. (Україна), Савуляк В.І. (Україна), Букетов А.В. (Україна), Костіков В.І., Конкін А.А., Мармер Е.Н., Половніков С.П. (Росія), С. Сімамура (Японія), П. Харрис (США) Дж. Любін (США).

У високотемпературних печах для теплоізоляції найбільше часто застосовують тугоплавкі метали: вольфрам або молібден, а також графіт, повсть, сажу й вуглецеві композиційні матеріали. Ізоляції з тугоплавких металів піддаються жолобленню, тендітному руйнуванню, деформації. Графіт також має ряд недоліків, що полягають у малій міцності, високому вмісті газів, високій температурі газовиділення, трудомісткості процесу виготовлення складних конструкцій для теплоізоляції. Повсті дають усадку, легко просочуються газами. Сажа, крім усадки й труднощів при футеровці печей, легко переноситься потоками газового середовища. Цих недоліків не мають низкощільні вуглецеві композиційні матеріали.

Науковий інтерес створення й дослідження, пористих вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів обумовлений можливістю їхнього використання як теплоізоляції за високих температур. Клас теплоізоляційних виробів на основі низькощільних вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів у цей час мало відомий і вивчений.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі металургії кольорових металів Запорізької державної інженерної академії. Частина експериментальних досліджень виконана на Запорізькому підприємстві «Вуглекомполит», а також у рамках держбюджетних робіт відповідно до планів Міністерства освіти та науки України за темами: 3 - 4/2000 «Підвищення якісних параметрів щільності вуглець - вуглецевих композиційних матеріалів» (договір про співпрацю з ДП «Вуглекомполит» № 236 від 02.11.2000 р.), 18 - 1/2005 «Закономірності формування фазового складу, структури та морфології дисперсних оксидних і металовуглецевих сполук у процесі гідрохімічної та термічної обробки» (наказ МОНУ № 960 від 22.12.2004 р., № держреєстрації 0105U000945), 3 - 1/2008 «Дослідження механізму та теоретичні узагальнення синтезу оксидно - металовуглецевих наноматеріалів широкого спектру застосування» (наказ МОНУ № 1044-01 від 27.11.2007г., № держреєстрації 0108U000583), ДЗ/60-2015 «Розроблення технології та організація промислового виробництва композиційних матеріалів, стійких в умовах дії високих температур та агресивних середовищ, для авіаційної та космічної техніки» (наказ МОНУ № від 30.10.2015г. № держреєстрації 011U004839).

Мета й завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є встановлення закономірностей формування структури та властивостей низькощільних вуглецевих композиційних матеріалів з підвищеною однорідністю і гарантованою щільністю не вище $0,30 \cdot 10^3$ кг/м³ для теплоізоляції електровакуумного обладнання.

Для досягнення мети необхідно було вирішити наступні завдання:

- провести аналіз сучасного стану технологій одержання вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів з комплексом заданих властивостей;
- визначити структурний склад вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу і необхідне співвідношення його компонентів: карбонізованих вуглецевих волокон, фенолформальдегідної смоли і матеріалів – утворювачів пор, щодо одержання матеріалу із заданою щільністю методом висадження з водної суспензії;
- встановити вплив в'язкості суспензії, швидкостей седиментації її компонентів, гідростатичного напору і величини залишкового тиску в процесі зливу суспензії на рівномірний розподіл щільності осаду по його висоті;
- розробити математичну модель процесу зливу водної суспензії, щодо встановлення впливу його технологічних параметрів на властивості висадженого осаду;
- розробити математичну модель процесу карбонізації, що забезпечує прогнозування фізико-механічних характеристик низькощільного вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу;
- визначити вплив структурного складу на фізико-хімічні, електрофізичні, теплофізичні й механічні характеристики низькощільних вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів;

Об'єкт дослідження - низькощільні вуглець-вуглецеві композиційні матеріали на основі карбонізованих вуглецевих волокон, фенолформальдегідної смоли та матеріалів пороутворювачів.

Предмет дослідження фізико-хімічні механізми й процеси формування структури низькощільних вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів, які одержані з використанням методу висадження з водних суспензії, фізичні, хімічні та функціональні властивості вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження процесів формування структури й властивостей композиційних матеріалів проводили з використанням підходів мікромеханіки суцільних середовищ і математичного моделювання. Експериментальні дослідження виконані із застосуванням сучасних методів фізичних та механічних випробувань (ГОСТ 2409-95, ГОСТ 18318-73 і ГОСТ 3584-73), мікроструктурного аналізу (ГОСТ 23402-78). Також використано традиційні методики визначення теплофізичних і механічних характеристик (коефіцієнт теплопровідності, температурний коефіцієнт лінійного розширення) відповідно до ГОСТ 23630.2-79.

Для оцінки міцнісних характеристик волокнистих компонентів, полімерної матриці й отриманого композиційного матеріалу розроблено нові методики визначення модуля пружності, лінійних й об'ємних усадок у процесі карбонізації.

Наукова новизна одержаних результатів. В дисертації вперше:

1. Встановлено вплив і визначені концентрації карбонізованих вуглецевих волокон, спіненого форполімеру, порошку феноло-формальдегідної смоли й утворювачів пор у водній суспензії на її в'язкість та визначені оптимальні значення відносного вмісту компонентів, що дозволяє формувати матеріал з рівномірним розподілом щільності за об'ємом в інтервалі $(0,17...0,30) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

2. Розроблено математичну модель процесу зливу водної суспензії, що адекватно описує вплив гідростатичного напору, глибини вакуумування, висоти

шару часток, які осаджують, швидкостей їх седиментації і граничної щільності впаковки на швидкість і час витікання рідкої фази.

3. Встановлено закономірності зміни фізико-хімічних, теплофізичних і механічних характеристик компонентів низькощільного вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу в процесі карбонізації.

4. Розроблено математичну модель процесу карбонізації, що дозволяє прогнозувати пружні і міцнісні характеристики, усадку і пороутворення в об'ємі низькощільного вуглець - вуглецевого композиційного матеріалу з урахуванням термохімічних перетворень його компонентів залежно від рівня діючих температур.

5. Розроблено технологічні режими одержання низькощільних вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів і досліджено їх фізико-хімічні, електрофізичні, теплофізичні й механічні характеристики. Показано, що збільшення щільності вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу від 0,17 до $0,3 \cdot 10^3$ кг/м³ призводить до зростання коефіцієнта теплопровідності від 0,15 до 0,8 Вт/м·К в інтервалі температур від 300 до 2400 К.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Встановлено послідовність основних етапів технологічної схеми одержання й компонентний склад низькощільного вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу із щільністю з 0,17 до $0,30 \cdot 10^3$ кг/м³ і її розкидом не більше $\pm 0,01 \cdot 10^3$ кг/м³. Розроблено технологічні рекомендації й технологічні режими одержання низькощільного вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу, які відпрацьовано в умовах ДП «Вуглекомпозит» (м. Запоріжжя), що підтверджено актом випробування.

2. Показана можливість використання варіантів теплоізоляції на основі низькощільних вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів для великогабаритних (до 2,5 м) високотемпературних (до 2700 °С) електровакуумних печей (УПФ, СШВГ, Ulvac).

3. Розроблено методику прогнозування пружних, міцнісних характеристик, термохімічних усадок в процесі карбонізації заготовки низькощільного вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу, яка дозволяє регламентувати температурно-часові режими, що забезпечують задану щільність і пористість із припустимим розкидом. Розроблено методи контролю фізико-механічних характеристик, що забезпечують вірогідність їх кількісних значень.

4. Виготовлено елементи теплових вузлів для вирощування кремнію й германію напівпровідникової чистоти, що дозволяють одержувати досконалі кристали, знизити рівень забруднення домішками металів і зменшити витрати дорогих теплоізоляційних матеріалів на основі вольфраму, молібдену та графіту особливої чистоти.

5. Отримані низькощільні вуглець-вуглецеві композиційні матеріали пройшли випробування при виготовленні й експлуатації теплових вузлів на ВАТ «Завод напівпровідників» (м. Запоріжжя), що показало безальтернативність використання низькощільних вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів при одержанні монокристалів кремнію для мікроелектроніки (підтверджене актом дослідно-промислового використання).

6. Використання термоізоляції з розробленого низько щільного вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу при експлуатації електровакуумних печей з робочою температурою від 1000 до 2500 °С дозволило знизити енергоспоживання в межах 40...50 %, збільшити ресурс роботи теплоізоляції на 30...50 %, підвищити ремонтпридатність, знизити витрати на підготовку до роботи. Встановлені результати підтверджені при експлуатації установок для вирощування монокристалів кремнію «Редмет – 15», «Редмет – 30».

Особистий внесок здобувача. Автором розглянуті та проаналізовані сучасні технології виготовлення вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів, побудовані математичні моделі досліджуваних процесів, розроблені методики, створено лабораторне устаткування, організовано та проведено експериментальні дослідження, математична обробка одержаних результатів. Наукові результати, висновки та рекомендації дисертаційної роботи належать особисто автору. Обґрунтування і аналіз отриманих результатів здійснювався в творчій співпраці з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідалися на 3-й міжнародній конференції «Матеріали й покриття в екстремальних умовах: дослідження, застосування, екологічно чисті технології виробництва й утилізації виробів» (АР Крим, 2004 р.), 6-й Міжнародній конференції «Устаткування й технології термічної обробки металів і сплавів» (м. Харків, 2005р.), міжнародній конференції й виставці «Композиційні матеріали в промисловості» (м. Ялта, 2006р.), II Всеросійської конференції по наноматеріалам і IV Міжнародному семінарі «Наноструктурні матеріали - 2007 Білорусь – Росія» (м. Новосибірськ, Росія, 2007р.), першій науково - практичній конференції з міжнародною участю «Комп'ютерне моделювання в хімії та технологіях» (м. Черкаси, 2008 р.), міжнародній конференції «Космічні технології: сьогодення й майбутнє» (м. Дніпропетровськ, 2011р., 2013р., 2015г.), 10-й конференції по актуальним проблемах фізики «Кремній – 2014» (м. Іркутськ, 2014р.), 5-й міжнародній науковій конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 5» (м. Київ, 2015р.).

Матеріали дисертації доповідались й обговорювались на щорічних наукових семінарах та конференціях Запорізької державної інженерної академії.

Роботу у повному обсязі було розглянуто на:

- розширеному засіданні кафедри металургії Запорізької державної інженерної академії, м. Запоріжжя (протокол № 15 від 13 червня 2017 р.).
- міжкафедральному науковому семінарі Запорізької державної інженерної академії, м. Запоріжжя (протокол № 2 від 15 червня 2017 р.).

Публікації. За результатами дослідження опубліковано 21 наукову працю, з яких: 10 статей у фахових виданнях України, 10 тез доповідей на наукових конференціях різного рівня, 1 патент України.

Структура й об'єм роботи. Робота складається із вступу, 5 розділів, висновків та додатків. Робота викладена на 141 сторінках машинописного тексту, містить 44 рисунки, 20 таблиць, п'ять додатків на 29 сторінках, список використаної літератури з 121 найменування на 14 сторінках. Загальний обсяг дисертації – 183 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведена оцінка сучасного стану проблеми, обґрунтовано актуальність вибору теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, завдання досліджень, наукову новизну й практичне значення отриманих результатів. Висвітлено особистий внесок здобувача і наведено відомості про апробацію результатів та кількість публікацій.

У першому розділі проведено літературний аналіз існуючих методів одержання пористих вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів з низькою щільністю. Розглянуто композиційні матеріали на основі вуглецевих волокон, особливості їх одержання та обробки, їх фізико-механічні характеристики.

Існуючі на сьогоднішній день методи й технології одержання пористих вуглець-вуглецевих матеріалів не дозволяють повною мірою формувати пористість і рівномірну щільність за об'ємом вуглецевого матеріалу. Підвищення пористості існуючими методами, які застосовують при виробництві вуглецевих матеріалів, трудомісткі й не ефективні, а пористість кінцевого вуглецевого матеріалу має наскрізний і нерегульований характер.

Обґрунтовано необхідність одержання низькощільного вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу із щільністю з 0,17 до $0,30 \cdot 10 \text{ кг/м}^3$ коефіцієнтом теплопровідності до $0,35 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ для високотемпературної теплоізоляції.

У другому розділі наведені відомості про обладнання для проведення випробувань, матеріали і методики досліджень. У якості компонентів низько щільного композиційного матеріалу вибрані: карбонізовані вуглецеві волокна марки КВТН, фенолоформальдегідна смола марки СФ-010 (ГОСТ 18694-80), віскозні волокна марки В (ТУ РБ 400031289.182 – 2001), бавовняні волокна (ТУ У 00306756.003-7). Для приготування форполімеру використовували фенолоформальдегідну смолу марки СФ-010 та твердник гексаметилентетрамін (ГМТА, ГОСТ 1381-73). У процесі роботи використано традиційні методики визначення структурних, теплофізичних, фізико-хімічних та механічних характеристик композиційних матеріалів. Теоретичні дослідження проводили із застосуванням математичного моделювання.

Визначення лінійних та об'ємних усадок, модуля пружності в процесі високотемпературної обробки проводили за допомогою спеціально розроблених методик. Лінійні і об'ємні усадки компонентів композиційного матеріалу визначали прямим вимірюванням лінійних розмірів зразків в процесі високотемпературної обробки через кожні $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Модулі пружності вуглецевих, віскозних волокон, форполімеру та зразків заготовки, що карбонізується, визначали за швидкістю розповсюдження ультразвукових хвиль з частотою 2 МГц. Випромінювач та приймач ультразвукових коливань розташовували на відстані 300 мм на поверхні зразків, час проходження ультразвукових хвиль фіксували приладом УК-10П.

У третьому розділі викладені результати дослідження процесу одержання пористих вуглець – вуглецевих композиційних матеріалів методом висадження з водних суспензій. Проведено класифікацію рубаних вуглецевих волокон, порошку феноло – формальдегідної смоли, порошку спіненого форполімеру та віскозного волокна (утворювача пор) по 12 фракціях (рисунок 1).

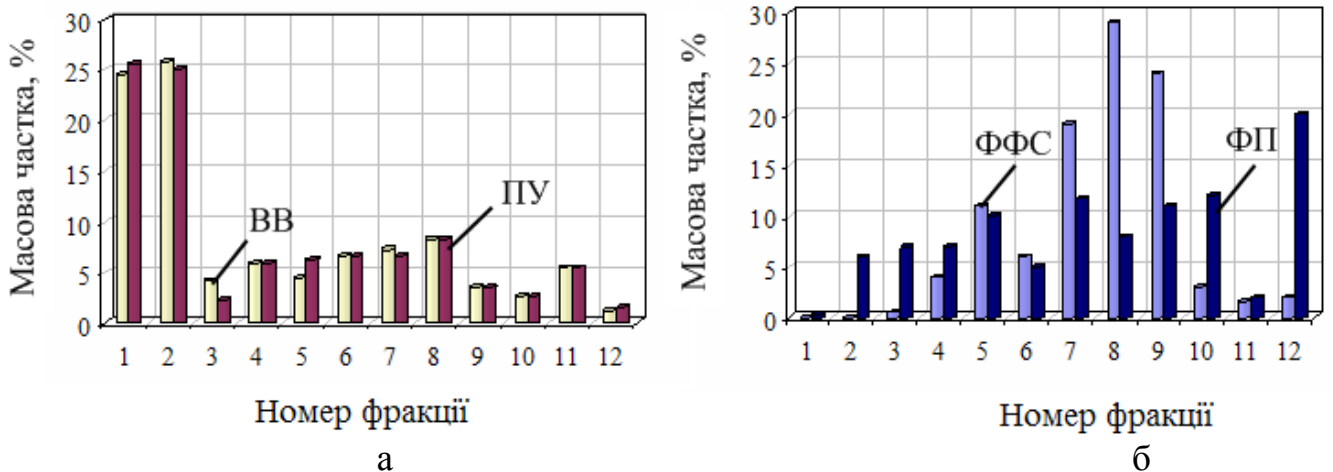


Рис. 1. Характер розподілу компонентів суспензії по фракціях

а: ВВ – карбонізовані вуглецеві волокна; ПУ – пороутворювач (вісконні волокна); б: ФФС – порошок фенолоформальдегідної смоли; ФП – форполімер.

Примітка: розподіл компонентів по фракціях:

- волокнистих матеріалів (довжина волокна, мкм): 1 – 900...1000; 2 – 800...900; 3 – 700...800; 4 – 600...700; 5 – 500...600; 6 – 400...500; 7 – 300...400; 8 – 200...300; 9 – 150...200; 10 – 100...150; 11 – 50...100; 12 – < 50;

- порошкоподібних (розмір часток, мм): 1 - > 2,5; 2 - 1,6...2,5; 3 - 1,0...1,6; 4 - 0,63...1,0; 5 - 0,4...0,63; 6 - 0,315...0,4; 7 - 0,2...0,315; 8 - 0,16...0,2; 9 - 0,1...0,16; 10 - 0,063...0,1; 11 - 0,05...0,063; 12 - < 0,05.

В'язкість суспензії, обумовлена концентрацією зважених часток у її об'ємі, є одним з основних параметрів процесу осадження. Дослідження в'язкості суспензії дозволило вибрати її структурний склад по кожному компонентові. Значення концентрації компонентів у суспензії наступні: карбонізованого вуглецевого волокна від 30 до 40 кг/м³, порошку фенолоформальдегідної смоли від 12 до 22 кг/м³, порошку форполімеру від 10 до 18 кг/м³, вісконного волокна (утворювача пор) від 30 до 50 кг/м³.

Процес зливу водної суспензії супроводжується явищами седиментації її компонентів, зміною ефективного опору витіканню рідкої фази в результаті збільшення шару осаду й формування його щільності.

Для урахування цих процесів розроблена математична модель процесу зливу суспензії, яка представлена у вигляді системи двох кінетичних рівнянь (1), (2). Перше рівняння описує швидкість витікання рідини, друге – швидкість збільшення шару впакованих часток:

$$\frac{dQ}{S \cdot dt} = \frac{P_h + (Q/S) \cdot \rho}{R_\phi + k \cdot h}, \quad (1)$$

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{dQ}{S \cdot d\tau} \cdot \frac{C}{C_n} + \sum_{i=1}^N V_i \frac{C_i}{C_n}, \quad (2)$$

де Q – об'ємна витрата води, м³; S – площа фільтра, м²; τ – час процесу, с; P_h – залишковий тиск вакуумування, кг/м²; ρ – щільність рідини, що витікає, кг/м³; R_ϕ – ефективний опір фільтра, кг·с/м³; k – ефективний коефіцієнт об'ємного опору шару

впакованих часток, $\text{кг}\cdot\text{с} / \text{м}^4$; h – висота шару впакованих часток, м; C – загальна концентрація всіх часток у воді, $\text{кг}/\text{м}^3$; C_n – концентрація впакованих часток, $\text{кг}/\text{м}^3$; V_i – швидкість осадження i -тої фракції при седиментації, м/с; C_i – концентрація часток i -тої фракції у воді, $\text{кг}/\text{м}^3$; C_n^i – концентрація впакованих часток i -тої фракції, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Інтегруючи рівняння (2) і підставляючи отримане вираження в рівняння (1), маємо

$$\frac{dQ}{d\tau} = \frac{P_h \cdot S + Q \cdot \rho}{\left(R_\phi + k \frac{C}{S \cdot C_n} \cdot Q_0\right) + \left[k \frac{C}{S \cdot C_n} \cdot Q + \left(\sum_{i=1}^N V_i \frac{C_i}{C_n^i}\right) \cdot \tau\right]}, \quad (3)$$

де Q_0 – початковий об'єм суспензії, м^3 .

Інтегруючи вираження (3) одержуємо трансцендентне рівняння:

$$\left(\frac{V \cdot U_n}{U \cdot V_n}\right)^A \left(\frac{(V/U) - R_2}{(V_n/U_n) - R_2}\right)^B = \frac{U}{U_n}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V &= Q - P_h \cdot S / \rho, & U_n &= -\frac{R_\phi + k \frac{C}{S \cdot C_n} \cdot Q_0}{\sum_{i=1}^N V_i \frac{C_i}{C_n^i}}, & A &= \frac{\sum_{i=1}^N V_i \frac{C_i}{C_n^i}}{R_2}, \\ \text{де } V_n &= Q_0 - P_h \cdot S / \rho, & R_2 &= \frac{(\rho - \sum_{i=1}^N V_i \frac{C_i}{C_n^i}) \cdot S \cdot C_n}{k \cdot C}, & B &= \frac{k \cdot C}{S \cdot C_n} - A, \\ U &= \tau - \frac{(R_\phi + k \frac{C}{S \cdot C_n} \cdot Q)}{\sum_{i=1}^N V_i \frac{C_i}{C_n^i}}, \end{aligned}$$

Рівняння (4) визначає витрата води Q через фільтр залежно від часу процесу τ , з урахуванням наростаючого шару впакованих часток, залишкового тиску й гідростатичного напору.

Для визначення ефективного опору осаду проведені експерименти за наступною схемою. Заданий обсяг приготовленої суспензії зливали на фільтрі з формуванням шару впакованих часток заданої товщини h . Через сформований на фільтрі осад пропускали воду з різним гідростатичним напором і величиною залишкового тиску, визначали час витікання заданого об'єму води. Отримані дані наведені на рисунках 2 і 3.

Здійснюючи інтегрування рівняння (1) за умови сталості товщини обложеного шару h , одержимо:

$$R_{\phi} + k \cdot h = - \frac{\tau}{\ln \frac{P_h \cdot S + Q}{P_h \cdot S + Q_0}} \quad (5)$$

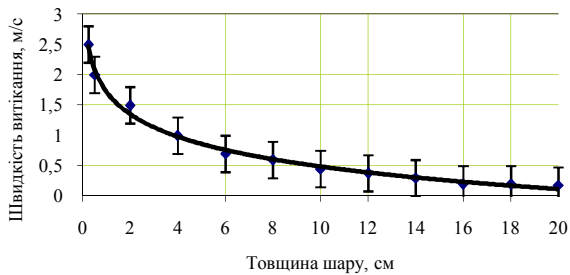


Рис. 2. Залежність швидкості витікання рідини від товщини шару, що осаджують

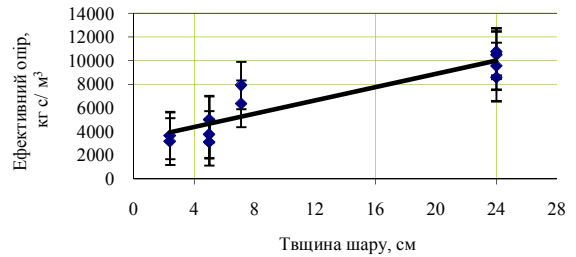


Рис.3. Залежність ефективного опору шару від його товщини

За даними рисунку 3, а також співвідношення (5), постійні R_{ϕ} і k приймають значення $R_{\phi} = 2700 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{м}^2$; $k = 2,8 \cdot 10^4 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{м}^3$

Чисельне рішення трансцендентного рівняння встановлює величини гідростатичного напору й залишкового тиску, які забезпечують рівномірність щільності низкощільного вуглець – вуглецевого композиційного матеріалу в межах $0,01 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ (рисунок 4).

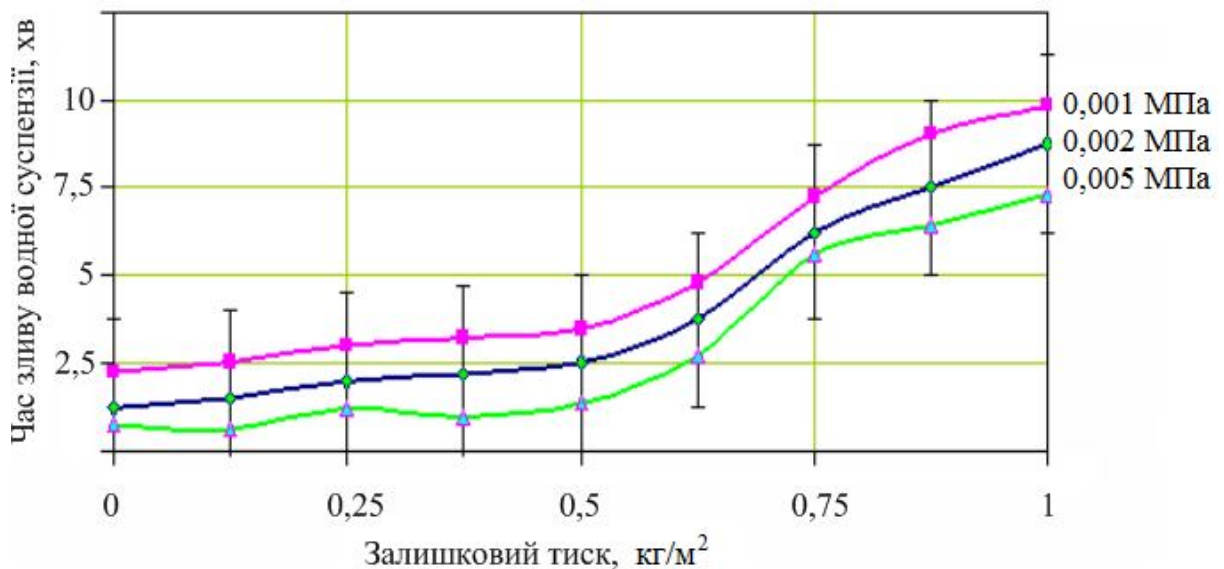


Рис. 4. Залежність часу витікання рідкої фази від величини залишкового тиску

З аналізу рисунку 4 видно, що припустимий залишковий тиск не повинен перевищувати $0,05 \text{ МПа}$ ($0,5 \text{ кг}/\text{м}^2$), а гідростатичний напір $0,002 \text{ МПа}$.

Зміна щільності осаду по його висоті обумовлено трьома факторами: швидкістю витікання рідини, гідростатичним напором і величиною залишкового тиску. Нижні, більше щільні шари осаду сформовані в процесі витікання рідини з

урахуванням часткової седиментації часток. При цьому в осаді реалізується рівномірний розподіл часток по фракціях.

Середні шари осаду сформовані за рахунок процесу седиментації й витікання рідини. У цих шарах переважають більші частки, гранична щільність упаковки яких низька. Верхні шари осаду сформовані в основному за рахунок витікання рідини. Мимовільний процес седиментації має незначне значення. Частки, що сформували верхні шари, мають найбільш дрібні розміри. За фазовим складом більшість часток дрібних фракцій є частками фенолоформальдегідної смоли. У результаті цього щільність верхніх шарів осаду значно вище. На рисунку 5 (крива 1) представлена залежність зміни щільності по висоті висадженої «мокрої» заготовки.

Отримані зразки піддавалися сушінню впродовж 3 годин за температурою 120°C и залишковому тиску 0,01 МПа. Результати зміни щільності досліджуваних зразків у процесі сушіння наведені на рисунку 5 (крива 2).

У четвертому розділі наведені процеси карбонізації вуглець - вуглецевих композиційних матеріалів з використанням утворювачів пор, введення яких забезпечує щільність кінцевого композиту від 0,17 до $0,30 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

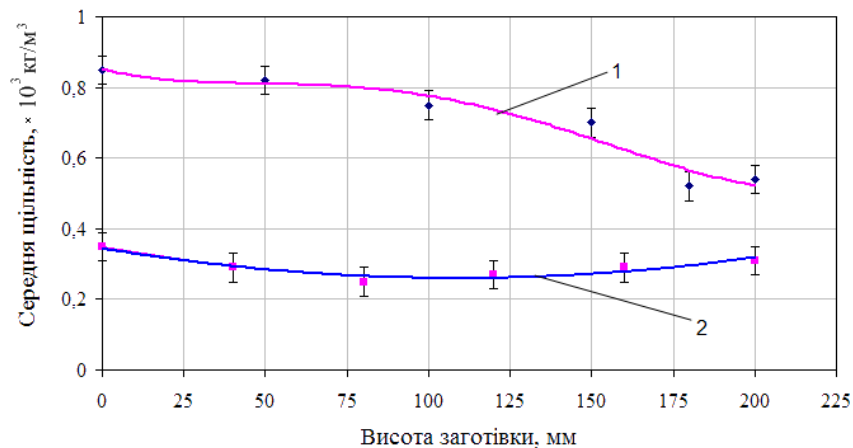


Рис. 5. Характер зміни щільності досліджуваних зразків:

1, 2 – щільність висадженої й висушеної заготовки за висотою осаду, відповідно

У процесі карбонізації вуглецевих композитів відбуваються складні фізико-хімічні перетворення в об'ємі полімерної матриці й пороутворювачів з утворенням коксового залишку. При цьому виділяються летучі газоподібні речовини різного складу й реалізуються процеси термохімічної усадки, пороутворення, відбувається зміна механічних характеристик компонентів та композиту в цілому.

Для розрахунку процесів можливе використання методів мікромеханіки композитів, при цьому класичні підходи мікромеханіки композитів доповнюються урахуванням процесів руйнування й зміни властивостей компонентів як у результаті механічних навантажень, так і температурного впливу.

Для оцінки властивостей низькощільного вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу у процесі карбонізації побудовано математичну модель. Модель заснована на постановці й розв'язанні статистичного крайового завдання мікромеханіки композиційних матеріалів, що дозволяє визначати мікроструктурні напруги, оцінювати рівень мікроструктурних перетворень, зміну властивостей і

коефіцієнтів термохімічних усадок в компонентах композиційного матеріалу (вуглецевих волокон, пороутворювачів і матриці). Крайове статистичне завдання мікромеханіки представлене системою рівнянь рівноваги, геометричних співвідношень, фізичних рівнянь і граничних умов:

$$\xi_{i\alpha, \alpha} = 0 ; \quad (6)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (\chi_{i,j} - \chi_{j,i}); \quad (7)$$

$$\xi_{ij} = \sum_{k=1}^N Q_{ij\alpha\beta}^k \cdot (1 - \omega^k) \cdot \lambda_k \cdot \left[\varepsilon_{\alpha\beta} - \sum_{k=1}^k b_{\alpha\beta}^k \cdot (1 - \psi^k) \cdot \lambda_k \cdot \Delta T \right]; \quad (8)$$

$$\chi_i \Big|_s = 0 , \quad (9)$$

де ξ_{ijk} , ε_{ij} - мікроструктурні напруги й деформації відповідно; χ_i - вектор випадкових мікроструктурних переміщень; Q^k_{ijmn} - випадкові модулі пружності компонентів композиційного матеріалу; ω^k - випадкові термоструктурні функції, які встановлюють залежність пружних властивостей композиційних матеріалів від ступеня їх структурних перетворень при термохімічній обробці й враховують процеси тріщиноутворення; λ_k - випадкова індикаторна функція, що визначає ймовірність належності розглянутої точки в об'ємі композита з номером k ; b_{ij}^k - випадкові компоненти лінійного термічного розширення компонентів; ψ^k - випадкові термоусадочні функції, які встановлюють залежність термохімічної усадки компонентів композиційного матеріалу від температури процесу; T - температура процесу; s - межа композиційного матеріалу; N - число компонентів у композиційному матеріалі; k - номер компонента композита ($k = 1 \dots N$).

Розв'язання крайового завдання (3)...(6) знаходиться у вигляді флуктуацій мікронапруг, які дозволяють обчислити дисперсії розподілу безумовних напруг (10):

$$\begin{aligned} \zeta_{ij}^0 = & \sum_{k=1}^N \theta_{ij\alpha\beta}^{0,k} (1 - \omega^k) \left[\lambda^k e_{\alpha\beta} + e_{\alpha\beta}^0 \cdot \sum_{k=1}^k b_{\alpha\beta}^k (1 - \psi^k) \lambda^k \cdot \Delta T \right] - \\ & - \sum_{i=1}^N C_{ij\alpha\beta}^k \cdot \omega^k \cdot \lambda^k \left[e_{\alpha\beta} + e_{\alpha\beta}^0 \cdot \sum_{k=1}^N b_{\alpha\beta}^k (1 - \psi^k) \cdot \lambda^k \cdot \Delta T \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Середні значення мікронапруг у компонентах композиту визначаються

$$\sigma_{ij}^k = \sigma_{ij} + \langle \lambda^k \rangle^{-1} \langle \lambda^0 \cdot \zeta_{ij}^0 \rangle; \quad (11)$$

де σ_{ij}^k - мікроскопічні напруги в компоненті з номером k ; σ_{ij} - макроскопічні напруги в композиті.

Дисперсії розподілу мікроструктурних напруг у компонентах композита з обліком (10) визначаються :

$$D_{ij}^k = \langle (\zeta_{ij}^{0,k})^2 \rangle = (\sigma_{ij})^2 + D_{ij}^{ij} - \langle \lambda^k \rangle \cdot \left\{ \langle \lambda^{0,k} \cdot (\zeta_{ij}^0)^2 \rangle + 2\sigma_{ij}^2 \langle \lambda^{0,k} \cdot \zeta_{ij}^0 \rangle \right\} \quad (12)$$

Моментні функції першого й другого порядків термоструктурних функцій представлені у вигляді:

$$\langle \omega^k \rangle = \int_{T_0}^T \langle \Omega^k \cdot (\zeta) \rangle \langle F^k \rangle dT ; \quad (13)$$

$$\langle (\omega^{0,k})^2 \rangle = \int_{T_0}^T \langle [\Omega^{0,k} \cdot (\zeta)]^2 \rangle \langle F^k \rangle^2 dT ; \quad (14)$$

де $\Omega^k(\zeta)$, $F_k(T)$ - випадкові функції, які залежать відповідно від рівня діючих напруг і температури.

В рівняннях (13) і (14) середні значення й дисперсії функції $\Omega^k(\zeta)$ задаються з урахуванням рівнянь (11) і (12):

$$\langle \Omega^k(\zeta) \rangle = P^k = 1 - \frac{1}{(2\pi \cdot D_{ij}^k)^{0,5}} \cdot \int_{\sigma_B^-}^{\sigma_B^+} \exp\left[-\frac{(x - \sigma_{ij}^k)^2}{2D_{ij}^k}\right] dx \quad (15)$$

$$\langle (\Omega^{0,k}(\zeta))^2 \rangle = P^k (1 - P^k) \quad (16)$$

де σ_B^+ , σ_B^- - межа міцності компонентів композиту при розтяганні й стиску відповідно.

Для полімерної матриці, пароутворювачів моментні функції першого й другого порядку для $F^k(T)$ представляють як

$$\langle F^k(T) \rangle = \sum_{i=1}^Q \varphi_i^k \cdot \exp\left[\frac{\delta_i^k (T_i - T_n)}{R \cdot T}\right]; \quad (17)$$

$$\langle F^{0k^2}(T) \rangle = \sum_{i=1}^Q h_i^k \cdot \exp\left[\frac{f_i^k (T_i - T_n)}{R^2 \cdot T^2}\right]^2, \quad (18)$$

де Q - число характеристичних температурних крапок, при яких змінюється характер залежності пружних властивостей від температури; φ_i , δ_i , h_i , f_i - експериментальні константи ($p = 1...3$; $q = 1...3$; $m = 1...3$; $n = 1...3$).

Моментні функції першого й другого порядку для ψ^k , що встановлюють залежність зміни термоструктурних усадок компонентів композиту від температури, можна також представити у вигляді рівнянь:

$$\langle \psi_{(T)}^k \rangle = \sum_{i=1}^Q \eta_i^k \cdot \exp \left[\frac{\Delta_i^k (T_i - T_n)}{R \cdot T} \right]; \quad (19)$$

$$\langle (\psi^k)^2 \rangle = \sum_{i=1}^Q \gamma_i^k \cdot \exp \left[\frac{Y_i^k (T_i - T_n)}{R^2 \cdot T^2} \right]^2, \quad (20)$$

На основі експериментального визначення усадок і зміни механічних характеристик компонентів вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу у процесі високотемпературної обробки обчислені константи у формулах (17), (18), (19), (20), що наведені в таблицях 1 і 2.

Таблиця 1

Параметри термоструктурних функцій для компонентів низькощільного вуглецевого композиційного матеріалу [формули (17) та (18)]

Компонент	Q	T ₁	T ₂	δ_i^k	φ_i^k	f_i^k	h_i^k
ФФС (СФ-010)	1	293	750	5,720519	34,19183	0,019677	9,999997
	2	750	1073	37,44899	7,473621	0,098157	4,999992
	3	1073	1273	-265,957	11269,24	0,456389	6,999984
Віскозні волокна (марки В)	1	293	700	8,042283	21,65334	0,023535	8,999971
	2	700	1100	63,38243	0,500189	0,080127	4,999991
Бавоняні волокна (ТУ У 00306756.003-97)	1	293	900	6,652676	9,909938	0,010162	5,999988
	2	900	1100	356,9315	0,001222	0,266947	2,999994

Таблиця 2

Параметри термоусадочних функцій для компонентів низькощільного вуглецевого композиційного матеріалу [формули (19) та (20)]

Компонент	Q	T ₁	T ₂	Δ_i^k	η_i^k	Y_i^k	γ_i^k
ФФС (СФ-010)	1	450	650	-0,78808	2,086057	0,136935	0,299999
	2	650	1000	-1,8468	4,508225	0,119592	1,199997
	3	1000	1250	-0,08632	13,03379	0,084796	1,299999
Віскозні волокна (марки В)	1	420	800	-4,83985	27,09312	0,067101	5,999975
	2	800	980	-0,05138	62,08627	0,18073	6,99999
	3	980	1180	0,029414	71,94803	0,17853	6,999992
Бавоняні волокна (ТУ У 00306756.003-97)	1	420	956	-8,86432	62,38047	0,018981	11,99998
	2	956	1180	-0,02027	71,04057	0,042383	7,099998

Розроблена модель дозволяє з використанням спеціально створеної програми здійснювати розрахунок середніх значень і дисперсій мікронапруг у компонентах вуглецевих композиційних матеріалів, виконувати оцінку пошкодження компонентів, оцінювати зміну пружних властивостей, коефіцієнтів термохімічної усадки й лінійного термічного розширення композита для довільних температур карбонізації.

У п'ятому розділі досліджено основні властивості й області застосування низькощільних вуглець – вуглецевих композиційних матеріалів. Основним застосуванням низькощільного вуглець - вуглецевого композиційного матеріалу з низькою щільністю є створення теплового опору між робочою зоною печі й металевим корпусом. Тому найважливішою властивістю низькощільного вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу є його теплопровідність (рисунок 6).

Структура порового простору низькощільного ВВКМ (рисунок 7) впливає на такі властивості як адсорбційна спроможність, газопроникність, теплопровідність, електропровідність. Залежно від значення щільності матеріалу можуть визначатися й можливі галузі застосування таких матеріалів.

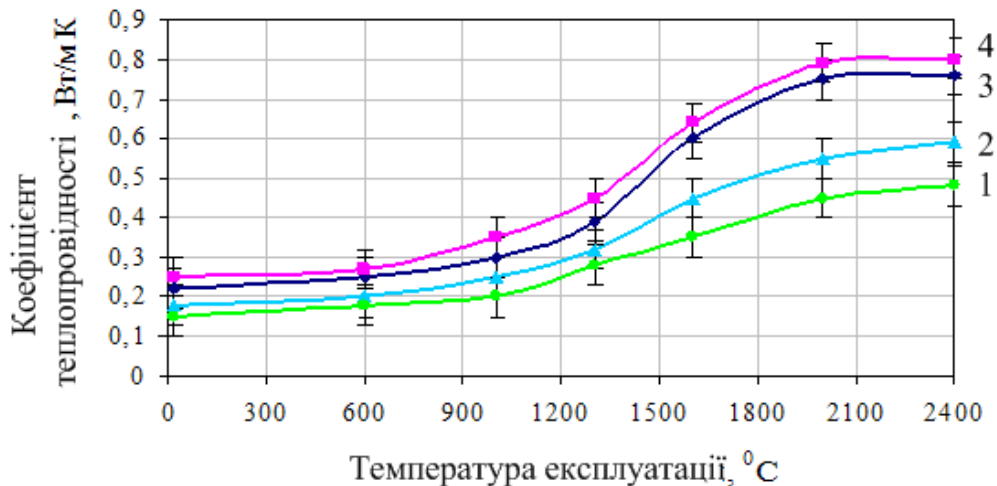
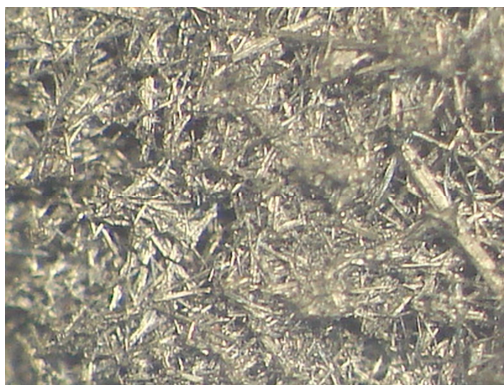
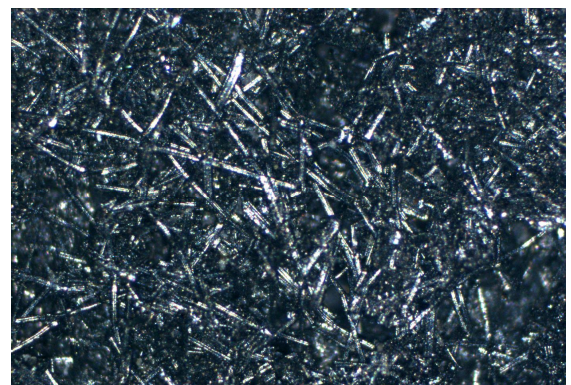


Рис. 6. Залежність коефіцієнта теплопровідності матеріалу від температури:
 1 – щільність матеріалу $0,17 \cdot 10^3$ кг/м³; 2 – щільність матеріалу $0,20 \cdot 10^3$ кг/м³;
 3 – щільність матеріалу $0,25 \cdot 10^3$ кг/м³; 4 – щільність матеріалу $0,30 \cdot 10^3$ кг/м³



а



б

Рис. 7. Структура низькощільного вуглецевого композиційного матеріалу:
 а) $\times 10$; б) $\times 20$

Іншою широкою областю застосування низькощільних вуглецевих матеріалів є створення на їхній основі міцних, ерозійностійких матеріалів. Зміцнення поверхневих шарів низькощільного вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу реалізується або осадження середньотемпературного піровуглецю, або наклейкою вуглецевої фольги з терморозширеного графіту. Приклад структури низькощільного вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу із покриттям з піролітичного вуглецю й вуглецевої фольги наведено на рисунку 8.

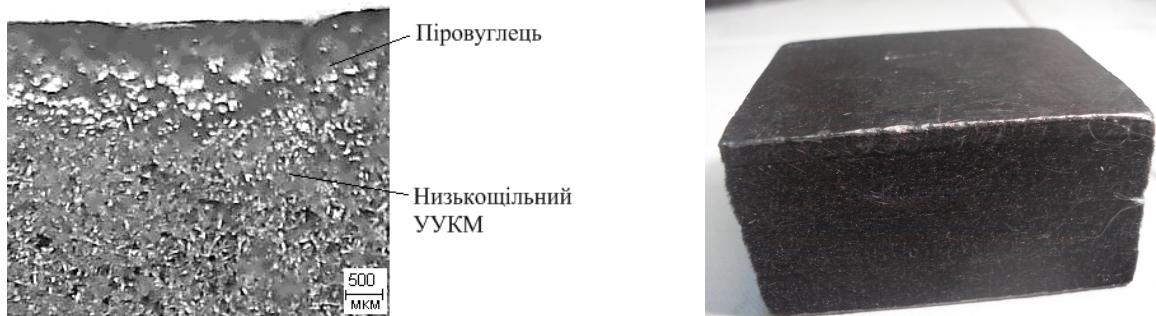


Рис. 8. Структура низькощільного вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу зі зміцненням поверхні

Завдяки своїм унікальним властивостям (можливість забезпечення високого ступеня просочення розплавами металів, кремнію, термостійкість, висока хімічна стійкість у багатьох окисних середовищах, легка механічна оброблюваність) області використання низькощільного вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу увесь час розширюються. Використання низькощільного вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу, що відзначаються низькою теплоємністю, в електровакуумному обладнанні, дозволяє різко підвищити його продуктивність (за рахунок скорочення часу на нагрівання), збільшити об'єм робочого простору камер установок (за рахунок зменшення об'єму теплоізоляції). Також достатньо ефективно використаннями низькощільного вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу у техніці високих температур, у тому числі для екранування деталей оснащення, нагрівальних елементів і корпусів високовакуумного обладнання або пристроїв, робітничим середовищем яких є інертні гази.

На основі низькощільних вуглецевих матеріалів можуть бути виготовлені міцні ерозійні матеріали, що одержують шляхом просочення кремнієм і іншими карбідоутворюючими елементами при високих температурах. Використання низькощільних вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів з покриттям з піровуглецю в процесах вирощування монокристалів завдяки низькій зольності і стійкості до стирання дозволяє знизити забруднення розплаву вуглецем, різко понизити вміст включень сажі і утворення шлаку, що дозволяє підвищити якісні характеристики кристалів, що вирощують.

При виробництві монокристалів кремнію використання низькощільних вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів в конструкції теплових вузлів дозволяє понизити споживання електроенергії до 50%, збільшити ресурс роботи теплоізоляції на 40...50%, знизити масу оснащення на 55...65%, скоротити час підготовки печі до плавки.

Використання низькощільних вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів в широкому діапазоні температур (1000...2500 °С) в електровакуумному обладнанні

дозволяє знизити витрату інших дефіцитних теплоізоляційних матеріалів (молібден, вольфрам, графіт та ін.).

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена науково-технічна задача створення нових низькощільних вуглецевих композиційних матеріалів для електровакуумного обладнання з підвищеними теплофізичними, механічними та конструкційними властивостями. Вирішення наукового завдання полягає у дослідженні властивостей і науково – обґрунтованому управлінні процесами структуроутворення в результаті прогнозованого додавання пороутворювачів заданого фракційного складу та форми за оптимального вмісту, а також встановлення закономірностей підвищення експлуатаційних характеристик матеріалів внаслідок керування процесом його формування. У результаті виконання роботи отримано наступні основні результати:

1. Вперше встановлено вплив складу водної суспензії, що складається з рубаного карбонізованого вуглецевого волокна, порошку фенолоформальдегідної смоли, порошку форполімеру та матеріалів пороутворювачів, на її в'язкість. Доведено, що збільшення концентрації компонентів в суспензії призводить до нерівномірного розподілу щільності по висоті осаду. Високий ступінь рівномірності (розкид не більше $\pm 0,01 \cdot 10^3$ кг/м³) та задана величина щільності від 0,17 до $0,30 \cdot 10^3$ кг/м³ висушеного та карбонізованого осаду досягається при концентрації компонентів у межах: карбонізованого вуглецевого волокна (КВТН) від 30 до 40 кг/м³, порошку фенолоформальдегідної смоли (СФ-010) від 12 до 22 кг/м³, порошку форполімеру (ФПФС70) від 10 до 18 кг/м³, віскозного волокна (марки В, утворювача пор,) від 30 до 50 кг/м³. Рекомендовані значення концентрацій компонентів забезпечують в'язкість суспензії на рівні $0,13 \pm 0,05$ Па·с.

2. Вперше встановлено, що для отримання рівномірного розподілу щільності в об'ємі композиту, в процесі зливу водної суспензії, важливе значення мають процеси седиментації її компонентів. Експериментально встановлені швидкості седиментації компонентів суспензії які складають: для порошку фенолоформальдегідної смоли (СФ -010) $V_i = (1,5 \dots 37) \cdot 10^{-3}$ м/с (для часток розміром від 0,16 до 1,0 мм); порошку форполімеру (ФПФС70) $V_i = (0,4 \dots 52,8) \cdot 10^{-3}$ м/с (для часток розміром від 0,05 до 2,5 мм); для карбонізованого вуглецевого волокна (КВТН) $V_i = (0,06 \dots 1,8) \cdot 10^{-3}$ м/с (для волокон розміром від 50 до 1000 мкм); для віскозного волокна (марки В) $V_i = (0,06 \dots 0,6) \cdot 10^{-3}$ м/с (для волокон розміром від 50 до 1000 мкм). Проведені дослідження дозволяють рекомендувати наступні геометричні характеристики вихідних компонентів: довжина вуглецевих волокон не більше 900 мкм; пороутворювачів - не більше 850 мкм, ефективний діаметр частинок фенолоформальдегідної смоли не більше 315 мкм; форполімеру не більше 630 мкм.

3. Вперше розроблена математична модель процесу зливу водної суспензії, що дозволяє встановити швидкість витікання рідкої фази від величини гідростатичного напору, залишкового тиску вакуумування, швидкостей седиментації компонентів суспензії, ефективного опору шару часток, що утворюються. Розроблена модель дозволяє із високою точністю, розраховувати параметри процесу зливу з формуванням осаду заданої щільності. Показано, що для отримання осаду з

рівномірною щільністю залишковий тиск, в процесі зливу, не повинен перевищувати 0,05 МПа, гідростатичний напір – 0,002 МПа, в'язкість суспензії - 0,13 Па·с.

4. Експериментально встановлені значення усадок компонентів композиційного матеріалу в процесі карбонізації, які складають: для порошку фенолоформальдегідної смоли від 2 до 4 % (за температури від 450 до 650 К), до 13% (за температури від 650 до 1000 К), до 16% (за температури 1250 К); для віскозного волокна (марки В) від 16 до 62 % (за температури від 420 до 800 К), до 72% (за температури від 800 до 980 К), знижується до 65% (за температури від 980 до 1180 К); для бавовняних волокон (ТУ У 00306756.003-97) від 16 до 71 % (за температури від 420 до 850 К), до 75% (за температури 1180 К). Модуль пружності компонентів в процесі термообробки приймає наступні значення: для порошку фенолоформальдегідної смоли зменшується з 100 МПа до 29 МПа (за температури від 293 до 1703 К), за температури 1273 збільшує своє значення до $E = 74$ МПа; для віскозного волокна (марки В) знижується E з 83 МПа до 8 МПа (за температури від 293 до 1100 К); для бавовняних волокон (ТУ У 00306756.003-97) E зменшується з 52 МПа до 3 МПа (за температури від 293 до 1100 К). Межа міцності матеріалів - пороутворювачі в процесі карбонізації приймає значення: віскозні волокна $\sigma = 120$ МПа, бавовняні волокна $\sigma = 3$ МПа. Межа міцності фенолоформальдегідної смоли в процесі карбонізації змінюється з 50 до 65 МПа.

Отримані експериментальні дані дозволяють визначати статистичні параметри випадкових термоструктурних і термоусадочних функцій для порошку фенолоформальдегідної смоли і матеріалів пороутворювачів (віскозних та бавовняних волокон).

5. Використовуючи основні теоретичні положення мікромеханіки композиційних систем розроблено математичну модель процесу карбонізації, що забезпечує прогнозування пружних і міцнісних характеристик, усадок і пороутворення в об'ємі низькощільного вуглецевого композиційного матеріалу з урахуванням зміни усадок компонентів вуглецевого композиційного матеріалу, їх пружних і міцнісних характеристик в залежності від рівня діючих температур в процесі карбонізації. Розраховані та експериментально підтверджено, що модуль пружності низькощільного вуглецевого композиційного матеріалу з підвищенням температури до 1173 К збільшується до 300 МПа, межа міцність композиційного матеріалу в процесі карбонізації різко змінюється після 673 К і досягає свого максимального значення 1,1 МПа за температури 1173 К. При перевірці даних експерименту з результатами моделювання встановлено відносну похибку 0,5...5,0 %, що свідчить про адекватність отриманих даних і їх узгодження з результатами оптимізації.

6. Встановлено, що для отримання композиту з поліпшеними теплофізичними властивостями необхідно вводити у склад композиту пороутворювачі (віскозні або бавовняні волокна) у кількості від 10 до 20 %. Коефіцієнт теплопровідності таких матеріалів становить: для матеріалу зі щільністю $0,17 \cdot 10^3$ кг/м³ $\lambda = 0,14$ Вт/м·К за температури 293 К та збільшується до $\lambda = 0,49$ Вт/м·К при $T = 2400$ К; для матеріалу зі щільністю $0,20 \cdot 10^3$ кг/м³ $\lambda = 0,18$ Вт/м·К за температури 293 К та збільшується до $\lambda = 0,59$ Вт/м·К при $T = 2400$ К; для матеріалу зі щільністю $0,25 \cdot 10^3$ кг/м³ $\lambda = 0,22$

Вт/м·К за температури 293 К та збільшується до $\lambda = 0,78$ Вт/м·К при $T = 2400$ К; для матеріалу зі щільністю $0,30 \cdot 10^3$ кг/м³ $\lambda = 0,26$ Вт/м·К за температури 293 К та збільшується до $\lambda = 0,81$ Вт/м·К при $T = 2400$ К.

7. Отримані наукові результати дозволили розробити оптимальний компонентний склад низькощільних вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів та технологічні режими їх виготовлення, що забезпечують стабільну щільність до $0,30 \cdot 10^3$ кг/м³ і високі теплоізоляційні властивості. Результати випробувань в умовах ДП «Вуглекомполит» та ПАТ «Завод напівпровідників» (м. Запоріжжя) довели зменшення енергоспоживання електровакуумного обладнання на 40...50%, збільшення ресурсу роботи на 30...50%, що підтверджено відповідним актом.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях:

1. **Карпенко Г.В.** Сучасний стан одержання низькощільних вуглецевих матеріалів / Карпенко Г.В., Воляр Р.М., Панова В.О., Голев Е.О. / *Металургія. Наукові праці ЗДІА.* – Запоріжжя, 2017. – № 1(37) – С. 95-99. (Внесок дисертанта: обґрунтування вибору технології формування заготовок з водяних суспензій та її структурний та компонентний склад).

2. Шулаев В. М. Современные вакуумные электропечи «ОТТОМ»ТМ и перспективы их использования для высокотемпературной пайки изделий из высоколегированных сталей / Шулаев В.М., Листопад Д.А., **Карпенко А.В.** // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.* – Запоріжжя, 2013. – №2. – С. 88-92. (Внесок дисертанта: участь у проведенні експериментальних досліджень та аналіз результатів експерименту).

3. Скачков В.А. Получение низкоплотных углеродных карбонизованных материалов / Скачков В.А., Червонный И.Ф., **Карпенко А.В.** // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* – Харьков, 2013. – № 5/6(65). – С. 48-51. (Внесок дисертанта: участь у проведенні експериментальних досліджень, аналіз та обґрунтування результатів експерименту). *Видання індексується в світових наукометричних базах даних і системах: Ulrich's Periodicals Director, DRIVER, BASE, Index Copernicus, ПИИЦ, ResearchBib, DOAJ, WorldCat, EBSCO, Directory Indexing of International Research Journals, DRJI, OAJI, Sherpa/Romeo, Open Access Articles.*

4. Богомаз А.В. Тепловой узел ростовой камеры установки выращивания крупногабаритных кристаллов германия методом погружного вращающегося формообразователя / Богомаз А.В., Критская Т.В., **Карпенко А.В.** // *Вопросы атомной науки и техники.* – Харьков, 2013. – №5(87). – С.179-182. (Внесок дисертанта: дослідження і обґрунтування якості теплоізоляції в електровакуумному обладнанні). *Видання індексується в наукометричній базі даних Scopus.*

5. Богомаз А.В. Расчет радиальных тепловых потоков при выращивании крупногабаритных кристаллов германия методом погружного вращающегося формообразователя / Богомаз А.В., Критская Т.В., Стрилько С.И., **Карпенко А.В.** // *Металургія. Наукові праці ЗДІА.* – Запоріжжя, 2011. – № 25. – С. 137-143. (Внесок

дисертанта: участь у проведенні експериментів та обробки отриманих результатів).

6. **Карпенко А.В.** Структурные особенности при карбонизации углеродных композиционных материалов / Карпенко А.В. // *Металлургия. Сб. научных трудов ЗГИА.* – Запорожье, 2007. – № 16. – С. 82-85.

7. Скачков В.А. Моделирование структурно – механических изменений при карбонизации композиционных материалов на основе углерода / Скачков В.А., Грицай В.П., Иванов В.И., **Карпенко А.В.** // *Вопросы химии и химической технологии // Научно – технический журнал ДХТУ.* – Днепропетровск, 2007. – № 6. – С. 165-167. (Внесок дисертанта: участь у проведенні експериментальних досліджень по визначенню механічних та теплофізичних характеристик вуглецевих композиційних матеріалів).

8. **Карпенко А.В.** Научные основы получения низкоплотных теплоизоляционного материала методом разлива из водных суспензий / Карпенко А.В. // *Вопросы химии и химической технологии // Научно – технический журнал ДХТУ.* – Днепропетровск, 2006. – №6. – С. 138-142.

9. **Карпенко Г.В.** Одержання низькощільних карбонізованих матеріалів / Карпенко Г.В. // *Металлургия. Сб. научных трудов ЗГИА.* – Запорожье, 2006. – № 13. – С. 139-141.

10. Скачков В.О. Моделювання процесу карбонізації вуглецевих композиційних матеріалів з утворювачами пор / Скачков В.О., **Карпенко Г.В.**, Иванов В.И., Грицай В.П., Карпенко Н.О. // *Металлургия. Сб. научных трудов ЗГИА.* – Запорожье, 2005. – № 12. – С. 80-86. (Внесок дисертанта: формування матеріалів та участь у проведенні розрахунків).

Патенти

11. Пат. 74738 Україна, МПК В01J 16/00, В01J 19/00. Пристрій для вирощування великогабаритних кристалів германію методом заглибленого обертового формоутворювача / Богомаз А.В., Критська Т.В., **Карпенко Г.В.**; винахідники; власник Запорізька державна інженерна академія. - № и 2012 04732 ; заявл. 17.04.2012 ; опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21. (Внесок дисертанта: участь у проведенні експериментальних досліджень та обґрунтування формули винаходу).

Статті у збірниках матеріалів і тез конференцій:

12. Скачков В.О. Формування структури та дослідження властивостей низькощільних високотемпературних теплоізоляційних матеріалів / Скачков В.О., Воденніков С.А., **Карпенко Г.В.** // *Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 5 : тези допов. 5-ї міжнар. наук. конф. 3-5 груд. 2015р.* – Київ. – 2015. – С. 63-65. (Внесок дисертанта: формування зразків для проведення експериментів).

13. Критская Т.В. Углеродные материалы для использования в процессе выращивания монокристаллов кремния по методу Чохальского / Критская Т.В., **Карпенко А.В.** // *Кремний – 2014 : тез. докл. 10-й конференции по актуальным проблемам физики 7-12 июня 2014г.* – Икрутск. – 2014. С. 138. (Внесок дисертанта: участь у проведенні експериментальних досліджень).

14. **Карпенко А.В.** Содержание углерода в монокристаллах кремния при использовании C/C и C/C – SiC материалов в конструкции телового узла / А.В. Карпенко, Т.В. Критская // *Космические технологи: настоящее и будущее : тез. докл. 5 - й межд. конф. 19-21 мая 2015 г.* – Днепропетровск. – 2015. – С. 60-61. (Внесок дисертанта: участь у проведенні експериментальних досліджень та аналіз отриманих результатів).

15. Быткин С.В. Термически и радиационно – стойкие материалы для космической электроники / С.В. Быткин, Т.В. Критская, **А.В. Карпенко**, Т.Б. Янко // Космические технологии: настоящее и будущее : тез. докл. 4 - й межд. конф. 17-19 апреля 2013 г. – Днепропетровск. – 2013. – С. 94. (Внесок дисертанта: участь у плануванні експерименту та обробка результатів дослідження).

16. Критская Т.В. Использование УУКМ в конструкции теплового узла для выращивания крупногабаритных монокристаллов германия для оптических систем / Т.В. Критская, **А.В. Карпенко** // Космические технологии: настоящее и будущее : тез. докл. 3 - й межд. конф. 20-22 апреля 2011 г. – Днепропетровск. – 2011. – С. 94. (Внесок дисертанта: експериментальні дослідження властивостей матеріалу).

17. **Карпенко А.В.** Модель процессов карбонизации углерод – углеродного композиционного материала / А.В. Карпенко, В.А. Скачков, В., А.С. Фильченков // Компьютерне моделювання в хімії та технологіях : перша наук. практ. конф. з міжн. уч. 12-16 трав. 2008 р. : тези доп. – Черкаси. – 2008. – С. 169-170. (Внесок дисертанта: участь у написанні математичної моделі та теоретичні розрахунки).

18. Скачков В.А. Моделирование процессов сокарбонизации углеродных композиционных материалов с порообразователями / В.А. Скачков, В.Д. Карпенко, **А.В. Карпенко**, В.И. Иванов, Т.Н. Нестеренко, // Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий: труды конф. 13-17 сентяб. 2004 г. – Крым, Кацивели-Понизовка. – 2004. – С. 61. (Внесок дисертанта: планування експерименту, обговорення та обробка отриманих експериментальних результатів).

19. Скачков В.А. Получение и применение низкоплотного углерод – углеродного композиционного материала / А.В. Скачков, **А.В. Карпенко**, В.И. Иванов // Наноструктурные материалы – 2007 Беларусь – Россия : 2-я всерос. конф. 13-16 марта 2007 г. – Новосибирск. – 2007. – С. 231. (Внесок дисертанта: визначення технології та дослідження теплопровідності та обробка результатів досліджень).

20. **Карпенко А.В.** Низкоплотные теплоизоляционные материалы – эффективная тепловая защита энергоустановок / А.В.Карпенко // Композиционные материалы в промышленности : материалы 26 межд. конф. и выст., 29 мая - 2 июня 2006 г., Ялта – Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2006. – С. 92-93.

21. Скачков В.А. Изменение свойств углеродных композитов с порообразователями в процессе карбонизации / Скачков В.А., **Карпенко А.В.**, Грицай В.П., Иванов В.И., Печеникова В.М. // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов : сб. докл. 6-й междун. конф., 16 – 20 мая 2005 г., Харьков, 2005. – С. 75-76. (Внесок дисертанта: участь в розробці математичної моделі та обробка результатів).

АНОТАЦІЯ

Карпенко А.В. Особливості формування структури та властивостей низькощільних вуглецевих композиційних матеріалів для теплоізоляції електровакuumного обладнання.- Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 - матеріалознавство. – Херсонська державна морська академія, Херсон, 2017.

Дисертаційна робота присвячена особливостям формування структури та властивостей низкощільних вуглецевих композиційних матеріалів методом висадження з водних суспензій на основі рубаного карбонізованого вуглецевого волокна, порошку фенолоформальдегідної смоли, порошку форполімеру та матеріалів – утворювачів пор, призначених для використання в якості теплоізоляційного матеріалу для електровакуумного обладнання, що працює при високих температурах.

В результаті проведених досліджень гранулометричного складу водної суспензії розроблені структура і геометричні характеристики вихідних компонентів: вуглецевого волокна не більше 900 мкм; фенолоформальдегідної смоли не більше 315 мкм; формполімеру не більше 630 мкм; пороутворювачів не більше 850 мкм. Вперше методом седиментаційного аналізу встановлені швидкості осадження кожного компонента суспензії, граничні концентрації упакованих частинок компонентів суспензії, що дозволяє прогнозувати щільність кінцевого матеріалу.

Розроблено математичну модель зливу водної суспензії, що встановлює вплив гідростатичного напору, глибини вакуумування, висоти шару впакованих часток, граничних концентрацій впакованих часток: встановлені значення залишкового тиску (не більше 0,01 МПа), гідростатичного напору (не більше 0,002 МПа) у процесі зливу водної суспензії, часу й температури сушіння висадженої заготовки.

Розроблено математичну модель процесу карбонізації, що адекватно описує прогнозування пружних і міцнісних характеристик, усадок і пороутворення в об'ємі низкощільного вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу. Визначені статистичні параметри випадкових термоструктурних і термоусадочних функцій компонентів вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу.

Визначений структурний, компонентний склад водної суспензії та технологічні особливості отримання матеріалу, що забезпечують гарантовану щільністю до $0,3 \cdot 10^3$ кг/м³ та її розкидом не більше $0,01 \cdot 10^3$ кг/м³. Розроблена й випробувана технологічна схема одержання вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів з регульованою щільністю.

Використання отриманого низько щільного вуглецевого композиційного матеріалу в якості теплоізоляції електровакуумних печей з робочою температурою до 2500 °С дозволило знизити енергоспоживання до 50%, збільшити ресурс роботи теплових вузлів до 40%, підвищити ремонтпридатність обладнання, знизити витрати на підготовку до роботи.

Ключові слова: низкощільний вуглець - вуглецевий композиційний матеріал, регульована щільність, суспензія, карбонізація, теплоізоляція.

АННОТАЦІЯ

Карпенко А.В. Закономерности формирования структуры и свойств низкоплотных углеродных композиционных материалов для теплоизоляции электровакуумного оборудования. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 – материаловедение. – Херсонская государственная морская академия, Херсон, 2017.

Диссертационная работа посвящена особенностям формирования структуры и свойств низкоплотных углеродных композиционных материалов методом высадки из водных суспензии, с возможностью их использования в качестве теплоизоляционного материала в электровакуумном оборудовании, работающего при высоких температурах.

В результате проведенных исследований гранулометрического состава водной суспензии разработаны структура и геометрические характеристики исходных компонентов: углеродного волокна не более 900 мкм; феноло-формальдегидной смолы не более 315 мкм; формполимера не более 630 мкм; порообразователей не более 850 мкм. Впервые методом седиментационного анализа установлены скорости осаждения каждого компонента суспензии, предельные концентрации плотноупакованных частиц компонентов суспензии, что позволяет прогнозировать плотность конечного материала.

Процесс слива описан математической моделью, учитывающей концентрацию каждого из компонентов водной суспензии, скорость осаждения каждой фракции, скорости истечения жидкости и роста слоя упакованных частиц, глубину вакуумирования, объемный расход воды, эффективное сопротивление фильтра.

Рассчитаны значения остаточного давления в процессе слива водной суспензии, составившее 0,01 МПа, величины гидростатического напора, равного 0,002 МПа. Предложен технологический режим сушки слитой заготовки.

Разработана математическая модель процесса карбонизации, учитывающая термохимические преобразования компонентов композиционного материала при различных температурах. Определены статистические параметры случайных термоструктурных и термоусадочных функций для феноло-формальдегидной смолы и материалов порообразователей. Предложенная модель позволяет обеспечить расчет упругих, прочностных характеристик, усадок и порообразования в объеме углерод-углеродного композиционного материала. Расчетные данные подтверждаются экспериментальными исследованиями с применением разработанных и стандартных методик.

Разработана технологическая схема получения низкоплотного углерод-углеродного композиционного материала со средней плотностью от 0,01 до $0,30 \cdot 10^3$ кг/м³, что также дало возможность получать углеродные материалы с регулируемой плотностью.

Использование полученного низкоплотного углерод-углеродного композиционного материала в качестве теплоизоляции электровакуумных печей с рабочей температурой до 2500 °С позволило снизить энергопотребление до 50 %, увеличить ресурс работы тепловых узлов до 40 %, повысить ремонтпригодность оборудования, снизить затраты на подготовку к работе.

Ключевые слова: низкоплотный углерод - углеродный композиционный материал, регулируемая плотность, суспензия, карбонизация, теплоизоляция.

ANNOTATION

Karpenko A.V. Regularities in the formation of the structure and properties of low-density carbon composites for electrovacuum equipment. - Manuscript.

The thesis for candidate degree of technical sciences, specialty 05.02.01 – materials science. – Kherson State Maritime Academy, Kherson, 2017.

The thesis is devoted to the peculiarities of the receipt and the formation of structure and properties low-density carbon-carbon composites by detonation of aqueous suspensions based on chopped carbon fibers, powder phenol-formaldehyde resin powder of prepolymer and materials - creators of pores for use as insulation material for electronic equipment operating at high temperatures.

The mathematical model draining aqueous suspension establishing the impact of hydrostatic pressure, vacuum depth, height packed layer of particles packed particle concentration limit, set the value of the residual pressure (less than 0,01 MPa) hydrostatic pressure (up to 0,002 MPa) in the drain aqueous suspension, drying time and temperature planted.

The mathematical model carbonization process that adequately describes the prediction of elastic and strength characteristics, to estimate the level of microstructural transformations and pore formation in volume low-density carbon-carbon composite material. Designated statistical parameters of random functions thermochemical shrinkage coefficients and linear thermal expansion of the composite for arbitrary carbonation temperatures.

The structural, composition of an aqueous suspension and technological features of obtaining materials that provide a guaranteed density to $0,3 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ and it spread no more than $0,01 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. Developed and tested technological scheme of obtaining carbon-carbon composite materials with variable density.

Key words: low-density carbon-carbon composite material, controlled density, suspension, carbonization, thermal insulation.