

ВІДГУК

на дисертаційну роботу Скачкова Віктора Олексійовича «**Науково-технічні основи формування функціональних властивостей композиційних матеріалів на основі вуглецю**»,
поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.16.06
Порошкова металургія і композиційні матеріали

Актуальність теми. У промислово розвинених країнах об'єм споживання вуглеграфітових матеріалів дорівнює об'єму споживання усіх металів разом взятих. Особливий інтерес представляють композити на основі вуглеграфітових матеріалів, передусім, вуглець-вуглецеві композиційні матеріали (ВВКМ), які широко використовуються у машинобудуванні, енергетиці, медицині тощо. Вдосконалення і виробництво вуглець-вуглецевих композитів є одним з найважливіших напрямів, які визначають науково-технічний розвиток провідних країн світу. Україна - одна з небагатьох країн, які володіють сучасними методами виготовлення ВВКМ, а ця галузь – одна із небагатьох, де наша країна зберігає свої лідерські позиції.

Дисертаційна робота Скачкова В.О. направлена на вирішення наукової проблеми - створення вуглепластикових та вуглець-вуглецевих матеріалів і виробів з них широкого функціонального призначення з високими, надійно прогнозованими та керованими властивостями, оптимізацію технології їх виготовлення на всіх стадіях, в тому числі шляхом їх математичного і комп'ютерного моделювання, що є поза сумнівом свідчить про актуальність роботи.

Дисертаційна робота Скачкова В.О. повністю відповідає паспорту спеціальності 05.16.06 – порошкова металургія і композиційні матеріали. У роботі розглядаються питання формування структури і дослідження властивостей вуглецевих композиційних матеріалів на основі керамічної карбідкремнієвої матриці, полімерних і вуглецевих матриць (паспорт спеціальності п. 6 - композиційні матеріали з металевою і керамічною матрицями, п. 8 - композиційні матеріали з полімерною і вуглецевою матрицями).

Наукова новизна отриманих результатів.

1. В роботі встановлено вплив основних технологічних параметрів на структуру і характеристики вуглепластикових заготовок на основі новолачних та резольних зв'язуючих. Побудовано регресійну модель для уточнення технологічних параметрів, що забезпечують відповідність технічним вимогам на зразки з вуглепластика. Адекватність побудованої моделі оцінена за критерієм Фішера.

2. Вперше, шляхом розробки моделі управління температурними режимами процесів ствердіння, розв'язано проблему підвищення якості заготовок, вузлів та елементів конструкції вуглепластика, що отверджуються в автоклавах з аеродинамічним нагрівом. Результати підтверджено даними експериментальної перевірки. Використання моделі сприяє підвищенню

виходу годного на 15%. Розроблено алгоритм та програма управління аеродинамічним приводом автоклава, які забезпечують відхилення температурно - часового режиму в процесі ствердіння не більше ніж на $\pm 3,0$ К.

3. Встановлено закономірності зміни механічних і теплофізичних характеристик в процесі карбонізації вуглепластиків на основі фенолформальдегідних зв'язуючих. Розроблено методику і побудовано алгоритм прогнозування пружних та теплофізичних властивостей, характеристик міцності вуглепластикових заготовок в процесі карбонізації, які базуються на рішенні статистичної крайової задачі мікромеханіки композиційних матеріалів з урахуванням термохімічних перетворень компонентів композиційних матеріалів.

4. Вперше запропоновано та розроблено математичну модель процесу профілізації пористої структури карбонізованих ВВКМ в проточному термохімічному реакторі в середовищі діоксиду вуглецю. Встановлено, що ефективний радіус пор, що виходять на поверхню ВВКМ, збільшується в 2,4...2,5 рази, а в середині стінки - на 25...30% у порівнянні з початковими порами. Такий профіль пористого простору ВВКМ дозволяє збільшити ефективність ущільнення пористих преформ піровуглецем із використанням, перш за все, промислових ізотермічних газофазних методів ущільнення. термоградієнтних методі.

5. Визначено механізм процесу ущільнення пористої структури карбонізованих вуглепластиків з урахуванням гомогенних процесів в об'ємі реактора та гетерогенних процесів у пористій структурі преформи. Розроблена математична модель газофазного процесу ущільнення ВВКМ з урахуванням реального розподілу пористої структури карбонізованих вуглепластиків. Модель дозволяє розрахувати концентраційні і температурні параметри ущільнення пористих ВВКМ в термохімічних реакторах як в середовищі природного газу, так і зріджених вуглеводнів зі зниженням температури процесу з $1000 \pm 50^\circ\text{C}$ до $700 \pm 30^\circ\text{C}$.

6. Вперше встановлено, що зі збільшенням мікродеформації пірографіту межа міцності на вигин пірографіту лінійно зростає, зі збільшенням міжплощинної відстані d_{002} має екстремальну характеристику. Створено регресійні моделі, які пов'язують параметри мікроструктури і деформаційні характеристики пірографіту.

7. Вдосконалена структура карбонізованих ВВКМ шляхом заповнення фторопластом Ф4 пористого об'єму із застосуванням вакуумно-компресійного способу просочення. Встановлено, що просочення суспензіями на основі наночастинок фторопласту Ф4 забезпечує зниження коефіцієнтів тертя з 0,17 до 0,025 (в 6,8 рази).

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень висновків і рекомендацій. Проведений автором математичний аналіз сучасних методів ущільнення пористої структури вуглецевих композитів піровуглецем з газової фази, дозволяє отримати розширене уявлення про внутрішні процеси, що протікають при реалізації цих методів, дати поглиблену оцінку переваг і недоліків кожного з методів, прогнозувати

оптимальні умови їх застосування для отримання композитів різного призначення. Особливий інтерес представляє розділ, що моделює термоградієнтне газофазне ущільнення піровуглецем, враховуючи, що саме ці методи використовуються в ННЦ ХФТІ. Результати моделювання таких процесів, представлені в дисертації, добре відповідають теоретичним і практичним даним, отриманим в ННЦ ХФТІ.

Основні положення дисертації, висновки і рекомендації науково аргументовані. Розрахункові характеристики по модулях пружності, міцності, теплофізичним характеристикам з достатньою точністю відповідають експериментальним значенням, отриманим автором і відомим з літературних джерел.

Практичне значення. Практичне значення не викликає сумнівів. Розроблений комплекс методів, алгоритмів і обчислювальних програм забезпечує створення композиційних матеріалів на основі вуглецю із заданими фізико-механічними та триботехнічними властивостями і створює наукову базу для розробки широкого класу вуглецевих композиційних матеріалів із вдосконаленими властивостями. Впровадження розроблених алгоритмів керування температурно-часовими режимами в процесі карбонізації вуглепластика для трьох видів серійних виробів для ракетно - космічного комплексу забезпечили зниження дефектоутворення на **15%**, скорочення матеріально-енергетичних витрат з річним економічним ефектом **553100** грн. на рік. (**Акт впровадження від 2011р ПАО «Укрграфіт»**). У роботі приведені дані про практичне використання результатів, які підтверджено відповідними актами від ведучих промислових підприємств України в області вуглецевих матеріалів (ПАО «Укрграфіт», ДЗ «Вуглекомпозит», УкрНДІТМ).

Розроблені підходи по моделюванню і розрахунку газофазних процесів можуть бути з успіхом використані в техніці і технології отримання полікристалічного кремнію електротехнічної чистоти, що отримується осадженням з газової фази.

Повнота викладу. Основні результати дисертаційної роботи повною мірою викладено в 25 тезах доповідей на міжнародних конференціях, в 36 статтях, опублікованих в спеціалізованих виданнях, з яких 14 входять до наукометричних баз даних, 3 монографіях та одному патенті України на корисну модель.

Структура і зміст дисертації. Зміст і оформлення дисертаційної роботи відповідає вимогам, які пред'являються до дисертаційних робіт на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук. Мова і стиль викладу роботи є послідовною, технічно грамотною і відповідає сучасним вимогам.

Дисертація складається з вступу, семи розділів, списку використаних літературних джерел, семи додатків. Робота викладена на 12,6 авторських аркушів, містить 74 рисунків, 61 таблиць, 8 додатків на 21 сторінках і список використаних літературних джерел з 290 найменувань. Загальний об'єм дисертації 16,3 авторських аркушів.

У **вступі** показана актуальність теми дисертації, сформульована мета і завдання дослідження, встановлено об'єкт і предмет дослідження. Визначена наукова новизна отриманих в роботі результатів, їх практичне і наукове значення, апробація і публікації основних положень роботи.

Перший розділ містить аналіз літературних даних по методах формування структурних параметрів і функціональних характеристик ВВКМ, виявлено невирішені проблеми і питання в технології ВВКМ.

У **другому розділі** обґрунтовано вибір напрямів досліджень, наводяться дані про матеріали і методи досліджень, представлено розроблені методи і методики експериментального дослідження і прогнозування характеристик ВВКМ.

Третій розділ роботи присвячено зробці технологічних методів формування заготовок з вуглепластику, моделюванню процесів отвердіння вуглепластикових заготовок в автоклавах аеродинамічного нагріву. Визначені характеристики якості вуглепластикових заготовок. Представлено антифрикційні вуглецеві композиційні матеріали на основі фторопластових матриць і матриць з антифрикційними добавками термічнорозширеного графіту.

В **четвертому розділі** розглянуто питання формування пружних, міцностних та теплофізичних властивостей в процесі карбонізації вуглепластика. З метою вирішення поставлених питань розроблена модель процесу карбонізації, в основу якої покладено рішення статистичної крайової задачі мікромеханіки композиційних матеріалів з урахуванням термохімічних перетворень компонентів композиту.

Проведено розрахунки фізико-механічних характеристик вуглецевих композитів в процесі карбонізації. При температурі 293 К представлено характеристики вуглепластика, а при 1073 К – карбонізованого композиту.

Карбонізовані вуглепластики мають високу пористість. Загальна пористість складає 30...32 %. Методом ртутної порометрії побудована крива розподілу пор по розмірах.

Проведено дослідження процесу профілізації пористої структури карбонізованих вуглецевих композитів. Процес профілізації реалізовано в проточному термохімічному реакторі в середовищі діоксиду вуглецю, який забезпечує збільшення ефективних радіусів пор від центру стінки до обох поверхонь карбонізованих вуглепластиків.

В **п'ятому розділі** представлено методи удосконалення структури карбонізованих ВКМ. Розглянуто рідинофазне просочення пористих вуглецевих композиційних матеріалів, яке реалізується методами інфільтрації і вакуумно-компресійного просочення, а також газофазне ущільнення пористої структури карбонізованих вуглепластиків піролітичним вуглецем в проточних реакторах циліндричного і плоского типів.

Виведено диференційне рівняння інфільтраційного просочення розплавом кремнію, яке враховує капілярні сили, сили в'язкого опору, гравітаційні сили і залишковий тиск вакуумування.

Рішення виведеного рівняння задає глибину проникнення розплаву кремнію по довжині пор в залежності від тривалості процесу.

Хімічний склад просочених кремнієм ВКМ, визначений

експериментально і розрахунками по розроблених моделях, містить карбїду кремнію 29...32 %, вуглецю 60...65 %, вільного кремнію 3...5 % і оксиду кремнію 0,9...1,2 %. Розрахункові значення відрізняються від експериментальних не більше ніж на 5 %.

Вакуумно-компресійним методом реалізовано просочення карбонізованих ВКМ фторопластовою суспензією. Розмір мікрочасток фторопласту Ф4 в суспензії не перевищують 0,01мкм, а вміст Ф4 у суспензії складає 20...25%.

Газофазне ущільнення в середовищі природного газу в проточному реакторі супроводжується гомогенними і гетерогенними процесами. Представлено розподіл мікроструктурних параметрів і розподіл піровуглецю по товщині стінок піроущільнених ВВКМ в умовах профільованої пористості. Вміст піровуглецю в центрі товщини стінки складає 19%, проти 14%, що були отримані раніше без попередньої профілізації.

Дослідним шляхом визначено коефіцієнти тертя та інтенсивність зносу піроущільнених ВВКМ на основі волокон УКН-5000, армованих під кутом $\pm 30^\circ$ до координати x_1 . Триботехнічні характеристики визначалися в площинах тертя, спрямованих під різними кутами

У розділі шість досліджено мікроструктурні параметри, механічні і триботехнічні характеристики пірографіту.

Досліджено зразки піролітичного графіту, які отримано піролізом природного газу при температурі 2473...2673 К. Осадження пірографіту здійснювалося на плоскій і об'ємній вуглецевих підложках.

Для оцінки залишкової макроскопічної напруги в пластинчатому пірографіті отримано формули, що визначають нормальну напругу і напругу зсуву за величиною експериментально виміряного прогину у центрі пластини прямокутного виду.

Безперечний науково - практичний інтерес представляє можливість конструктивного вдосконалення технологічного оснащення по розрахунково - експериментальним даним процесу отримання пірографіту у багатомісних термохімічних реакторах.

У розділі сім представлено спеціальні властивості та застосування ВВКМ для нагрівачів і теплових вузлів великогабаритних високотемпературних електровакуумних агрегатів, силіційованих ВВКМ для вузлів та елементів безперервного розливання кольорових і чорних металів і сплавів.

Особливості застосування ВВКМ в якості нагрівачів для високотемпературних електровакуумних агрегатів обумовлені значною залежністю питомого електричного опору (ПЕО) від температури. Значне зниження ПЕО при температурах вище 1000 К припускає керування температурним режимом методом регулювання за величиною електричного струму.

Зауваження по роботі. Відмічаючи позитивні результати роботи Скачкова В.О. необхідно відмітити ряд недоліків і зауважень:

1. У розділі 1.5 таблиці 1.8 доцільно упорядкувати класифікацію вуглецевих волокон окремо за міцністю та модулем пружності.

2. У розділі 2.4, присвяченому методиці прогнозування теплофізичних

характеристик неочевидно, яким чином враховується пористість композиційних матеріалів.

3. У запропонованих методах визначення вмісту піровуглецю (п. 2.6.1) не зрозумілий механізм обліку часток сажі, які можуть утворюватися усередині пор матеріалу при газофазному ущільненні.

4. Використання матеріалу, представленого в розділі 5.4 вимагає володіння складним математичним апаратом. З практичної точки зору, більший інтерес представляли б графіки з конкретними цифровими значеннями величин, визначених для типових процесів.

5. У розділі 5.6 при моделюванні процесу ущільнення не приведена розрахункова температура процесу.

6. У розділі 5.7 доцільно уточнити поняття шарів, з яких відбирали проби для визначення вмісту піровуглецю, їх зв'язок з шарами армуючих волокон, загальну кількість шарів в зразку, товщину кожного шару.

7. У розділі 6.1 було б бажано розписати методику отримання формул (6.1) і (6.2).

8. У розділі 7.1 використовується поняття рівноважної температури (рис. 7.2) доцільно було дати її визначення.

Вказані зауваження не знижують загальної позитивної оцінки, а пов'язані, передусім, з великим інтересом до виконаної роботи.

За актуальністю, науковою новизною, обсягом проведених експериментальних досліджень, їхньою науковою та практичною значимістю робота Скачкова Віктора Олексійовича «Науково-технічні основи формування функціональних властивостей композиційних матеріалів на основі вуглецю», **відповідає** вимогам «Порядку присудження наукових ступенів» зі змінами, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013р. № 567, а її **автор заслуговує присудження** йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.06 – Порошкова металургія і композиційні матеріали.

Начальник відділу вуглець-графітових матеріалів
Інституту фізики твердого тіла, матеріалознавства
та технологій Національного наукового центру
«Харківський фізико-технічний інститут»,
НАН України,

д.т.н., старший науковий співробітник

В.А. Гурін

