

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ім. І.М. ФРАНЦЕВИЧА

СКАЧКОВ ВІКТОР ОЛЕКСІЙОВИЧ



УДК 620.22:539.4:669.02

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ
ФОРМУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ
ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИЦІЙНИХ
МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ВУГЛЕЦЮ**

05.16.06 - порошкова металургія і композиційні матеріали

Автореферат дисертації на здобуття вченого ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2018 р

Дисертацією є рукопис.

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

Офіційні

опоненти:

доктор технічних наук, професор

САНІН АНАТОЛІЙ ФЕДОРОВИЧ,

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара МОН України,

завідувач кафедрою технології виробництва

доктор технічних наук, професор

БУКЕТОВ АНДРІЙ ВІКТОРОВИЧ,

Херсонська державна морська академія МОН України,

завідувач кафедрою транспортних технологій

доктор технічних наук, старший науковий співробітник

ГУРІН В'ЯЧЕСЛАВ АНАТОЛІЙОВИЧ,

Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства і технологій Національного наукового центру

«Харківський фізико-технічний інститут», НАН України,

керівник відділу вуглець-графітових матеріалів

Захист відбудеться « 05 » лютого 2018 р. о 10³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.207.03 в Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України за адресою: 03680, м.Київ-142, вул. Кржижанівського, 3.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України за адресою: 03680, м.Київ-142, вул. Кржижанівського, 3.

Автореферат розіслано « 03 » січня 2018 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 26.207.03

кандидат технічних наук



О.В. Хоменко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним з найважливіших напрямів, які визначають розвиток усіх галузей промисловості, будівництва, медицини і сфери послуг є нові матеріали. Використання нових матеріалів забезпечить технологічну революцію в різних галузях техніки.

Вуглецеві композиційні матеріали, які мають широкий спектр експлуатаційних властивостей, знаходять застосування в різноманітних галузях науки, техніки і промисловості.

Одним з пріоритетних напрямів розвитку нових матеріалів і технологій для розробки двигунних установок систем космічної техніки є композиційні матеріали на основі вуглецевих волокон і полімерних, вуглецевих і керамічних матриць.

Вдосконалення технології і розробка конструктивно-технологічних схем для авіаційних, ракетно-космічних вузлів і елементів припускає використання великогабаритних і особливо великогабаритних високотемпературних електровакуумних установок. Створення таких електровакуумних установок базується на застосуванні нагрівачів, теплоізоляції і конструктивних елементів з вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів.

Найбільш перспективними матеріалами для кісткових імплантів в ортопедії і травматології є градієнтнопористі вуглець-вуглецеві композиційні матеріали (ВВКМ) як карбонізовані, так і піроущільнені з газової фази.

Розширення сфери застосування ВВКМ обмежується їх високою вартістю. Зниження енерговитрат, підвищення виходу придатної продукції, скорочення технологічного циклу виробництва ВВКМ на основі методів і моделей для розрахунків технологічних режимів на всіх технологічних етапах отримання ВВКМ знімає обмеження по їх застосуванню.

Створення і вдосконалення ВВКМ шляхом застосування нових методів формування структури і регулювання властивостей, адаптованих до сучасних технічних систем і умов їх експлуатації, є актуальною науково-технічною проблемою. Її рішення дозволить істотно розширити експлуатаційні і енергетичні характеристики технічних систем, діапазон їх працездатності, економічну ефективність і підвищену надійність.

Наукова і прикладна проблема, яка вирішується у роботі, - створення вуглепластикових та вуглець-вуглецевих матеріалів і виробів з них широкого функціонального призначення з високими, надійно прогнозованими та керованими властивостями, оптимізація технології їх виготовлення підчас всіх технологічних операцій, в тому числі шляхом їх математичного і комп'ютерного моделювання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Тематика і структура проведених досліджень відповідають плану науково-дослідних робіт кафедри металургії кольорових металів Запорізької державної інженерної академії (ЗДІА) і програмам науково-дослідних робіт ЗДІА: по темі «Вдосконалення конструктивних параметрів

проточних реакторів і технології виробництва виробів на основі моделей газотермічних процесів» (номер держ. реєстрації 01870071795); ВАТ «ДЗ Вуглекомполімер» по темі «Підвищення щільності, окислювальної стійкості і механічних властивостей в процесі силіціювання ВВКМ»; УкрНДІТМ по темі "Дослідження технології і властивостей композиційних матеріалів на основі вуглецю"; держзамовлення по темі «Розроблення технології та організація промислового виробництва композиційних матеріалів, стійких в умовах дії високих температур та агресивних середовищ, для авіаційної та космічної техніки» (номер держ. реєстрації 011U004839) (у вищеперелічених темах здобувач як керівник, планував проведення НДР, розробляв моделі процесів, методи розрахунку властивостей і технологічних режимів отримання композиційних вуглецевих матеріалів, проводив експерименти і аналіз отриманих результатів, формулював висновки); держбюджетна НДР «Дослідження структуроутворення триботехнічних характеристик багатокомпонентних композитів з дифузійними покриттями адаптаційного типу» (номер держ. реєстрації 011U02177), у рамках теми особисто здобувачем, як відповідальним виконавцем були розроблені моделі прогнозування коефіцієнтів тертя, інтенсивності зносу, проведена оцінка точності запропонованих моделей і їх застосування для багатокомпонентних композиційних матеріалів.

Мета та завдання досліджень. Встановити науково-технічні основи формування структури композиційних матеріалів на основі вуглецю з метою забезпечення заданих функціональних характеристик. Розробити методи управління технологічними режимами по основних стадіях виробництва ВВКМ і спрогнозувати фізико-механічні і функціональні характеристики.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- розробити методи формування кількісних характеристик структури і фізико-механічних властивостей із застосуванням методик і алгоритмів управління температурними режимами отвердіння при отриманні вуглепластика;
- розробити метод прогнозування фізико-механічних характеристик і технологічних режимів процесу карбонізації вуглепластика з урахуванням термохімічних перетворень кожного компонента композиту;
- розробити методику розрахунку і технологію профілізації пористої структури карбонізованих вуглецевих композиційних матеріалів, які забезпечують задані фізико-механічні характеристики;
- розробити методи розрахунку і технологію заповнення пористої структури карбонізованих композитів з профільованою пористістю піровуглецем з газової фази, водними суспензіями і розплавом кремнію із забезпеченням спеціальних властивостей ВКМ;
- дослідити параметри мікроструктури, рівень залишкових термохімічних деформацій і оцінити їх вплив на фізико-механічні і триботехнічні характеристики об'ємного і пластинчатого пірографіту;

– розробити технологію отримання і дослідити їх фізико-механічні і триботехнічні характеристики багатокомпонентних фрикційних і антифрикційних композиційних матеріалів.

Об'єкт дослідження. Закономірності перетворень структури і властивостей по технологічних переділах отримання вуглепластиків, карбонізованих вуглепластиків, ВВКМ, ущільнених піровуглецем з газової фази, силіційованих ВВКМ.

Предмет дослідження. Композиційні матеріали на основі вуглецевих волокон УКН – 5000, ВМН – 4; вуглецевих графітованих тканин ЕТАН, ТГН – 2М, Урал Т-22 і фенолоформальдегідних зв'язуючих (СФ – 010 + ГМТА, ЛБС-20) та фторопластових матриць.

Методи дослідження. Для проведення досліджень використовувалися стандартні методи:

– визначення в'язкості зв'язуючого проводилося відповідно до ГОСТ 9070-75 на віскозиметрі ВЗ–246;

– характеристики міцності визначалися відповідно до ГОСТ 25.601–80, ГОСТ 25.604–82;

– коефіцієнти тертя і інтенсивність зносу визначалися на машині тертя 2070 СМТ – 1М;

– питомий електричний опір визначався двохзондовим методом на приладі Р – 380;

– рентгеноструктурні параметри визначалися за відомою методикою на установці ДРОН-2У;

– мікроструктурні дослідження проводилися на електронному растровому мікроскопі РЕМ – 200;

Для проведення окремих досліджень розроблено спеціальні методики:

– розроблена методика розрахунку процесів вакуумно-компресійного просочення пористих композиційних матеріалів водними суспензіями, розплавами металів, що реагують і не реагують з компонентами композиту;

– вдосконалена методика прогнозування властивостей пружності та міцності, коефіцієнтів лінійного термічного розширення і коефіцієнтів теплопровідності, заснована на рішенні статистичної крайової задачі мікромеханіки композиційних матеріалів;

– розроблена методика прогнозування коефіцієнтів тертя і інтенсивності зносу;

– розроблена методика визначення вмісту піровуглецю по товщині ущільнених ВВКМ з газової фази;

– розроблена методика дослідження ерозійної стійкості ВВКМ в високоенергетичних потоках газу.

Оцінка адекватності розроблених і адаптованих методик, достовірність запропонованих теоретичних рішень і методів виконувалася шляхом зіставлення з достатньою кількістю спеціально поставлених експериментів. Обробка результатів експериментів проводилася методами

статистичного і регресійного аналізу з використанням комп'ютерної техніки, адекватність розрахунків оцінювалася за критерієм Фішера.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Ретельно вивчено вплив основних технологічних параметрів на структуру і характеристики вуглепластикових заготовок на основі новолачних та резольних зв'язуючих, а саме: умовна в'язкість в межах 70...100 с для ВЗ- 246, що забезпечує повне проникнення зв'язуючого в простір між елементарними волокнами; питоме натягнення в межах 8...12 % від розривного зусилля волокна, залишковий тиск вакуумування до 0,005 МПа, максимальний тиск та температура 418 ± 5 К визначають ступінь ствердіння зв'язуючого в межах 94...96%, щільність заготовок в межах 1240...1350 кг/м³. Побудовано регресійну модель для уточнення технологічних параметрів, що забезпечують технічні вимоги на зразки з вуглепластика. Адекватність побудованої моделі оцінювали за критерієм Фішера.

2. Вперше розв'язано проблему підвищення якості заготовок, вузлів та елементів конструкції вуглепластика, що стверділі в автоклавах з аеродинамічним нагрівом шляхом розробки моделі управління температурними режимами процесів ствердіння і експериментальної перевірки, що дозволило підвищити на 15% вихід годного. Модель враховує теплову інерційність системи «оправка – заготовка що стверджується - еластична діафрагма - металевий кошик» і робоче середовище автоклаву. Розроблено алгоритм й програма управління аеродинамічним приводом автоклава, який забезпечує відхилення температурно - часового режиму в процесі ствердіння не більше $\pm 3,0$ К, створює можливість повного видалення летючих в процесі ствердіння.

3. Встановлено закономірності зміни механічних і теплофізичних характеристик в процесі високотемпературної обробки (карбонізації) вуглепластиків на основі фенолоформальдегідних зв'язуючих. В межах температур до 720 К реалізується зменшення модулів пружності с 11,8 ГПа до 10,5 ГПа, меж міцності – с 99,1 до 88,8 МПа і термохімічних усадок - на 4,0...5,5 %. При температурах до 1100 К модулі пружності набувають значення 11,1 ГПа, межа міцності - 94,2 МПа, термохімічні усадки – 11...13 %. Розроблена методика і побудовано алгоритм прогнозування пружних та теплофізичних властивостей і 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 процес профілізації пористої структури карбонізованих ВВКМ. Розроблена математична модель процесу профілізації в проточному термохімічному реакторі в середовищі діоксиду вуглецю. Встановлено, що при температурі 1030...1130 К 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 вміст піровуглецю, що осаджений в ізотермічних умовах ущільнення, з 14% до 19% й, отже, підвищити міцність на 7...10%.

5. Визначено механізм гомогенно-гетерогенного процесу ущільнення пористої структури карбонізованих вуглепластиків. В результаті гомогенних процесів в об'ємі реактора утворюються реакційні гази - ацетилен, радикали - метилен, етініл і багатоатомні важкі вуглеводні, а також наночастки технічного вуглецю. Частина реакційних газів, що досягли пористої поверхні, дифундують в пори, інша частина газів розкладається на безпористій поверхні з осадженням твердого осаду - піровуглецю. Реакційні гази, проникаючи в пористу структуру, розкладаються на поверхні пор з осадженням піровуглецю, котрий заповнює об'єм пор. Розроблена математична модель газофазного процесу ущільнення пористих ВВКМ з урахуванням реального розподілу пористої структури карбонізованих вуглепластиків. Модель дозволяє розрахувати концентраційні і теплові 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 з 6,0 до 24,0 МПа, зменшується з 23,0 до 20,5 МПа зі збільшенням міжплощинної відстані d_{002} , має екстремальну характеристику від величини розміру кристалітів. Максимальне значення межі міцності на вигин 24,5 МПа досягається при висоті кристалітів $L_c = 93 \cdot 10^{-10}$ м. Доведено, що при такому розмірі кристалітів створюється критична величина міжкристалітних границь, вище за яку відбувається втрата міцності пірографіту. 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 залишковий тиск вакуумування до 0,005 МПа карбонізованих ВВКМ і надлишковий компресійний тиск до 700 МПа при просоченні суспензіями на основі наночастинок фторопласту Ф4 забезпечує заповнення до 98% об'єму пористого простору, знижує коефіцієнти тертя в 6,8 рази з 0,17 до 0,025.

Практичне значення. Розроблений комплекс методів алгоритмів і обчислювальних програм забезпечує створення композиційних матеріалів на основі вуглецю із заданими фізико-механічними і триботехнічними властивостями. Впровадження розроблених алгоритмів управління 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 **20.09.2011р** ПАО «Укрграфіт»).

Розроблена і експериментально перевірена технологія профілізації пористої структури ВВКМ, ущільнення її з газової фази і заповнення вакуумно-компресійним методом розплавом кремнію і водною суспензією на основі фторопласту Ф4.

В умовах ДЗ «Вуглекомполімер» проведено дослідне відпрацювання процесів силіціювання ВВКМ, встановлено параметри процесів просочення розплавом кремнію і карбідизації. Щільність отриманого силіційованого ВВКМ склала $2,28 \pm 0,03$ г/см³, вміст карбиду кремнію $30 \pm 2\%$, вільного кремнію $4 \pm 1\%$, оксиду кремнію $2,9 \pm 0,2\%$, залишковий вміст вуглецевих волокон $58 \pm 5\%$. (Акт від **14.11.2012р**). Отримано патент України на корисну модель № **116333** - Спосіб виготовлення силіційованого композиційного матеріалу.

Силіційований ВВКМ, після режиму карбідизації, використано в якості зносостійкого покриття в ежекторах, призначених для подачі газопилового середовища в технологічне устаткування в умовах високих лінійних швидкостей і активного перемішування. Дослідно-промислове випробування таких ежекторів показало підвищення ресурсу в 62 рази в порівнянні з штатним варіантом. Ежектор зі зносостійким покриттям рекомендовано для промислового використання в умовах ВАТ «Укрграфіт». (Акт від **08.08.2008р**).

Встановлена ефективність застосування ВВКМ для елементів нагрівачів і теплових вузлів великогабаритних і надвеликогабаритних високотемпературних електровакуумних агрегатів. Теплові вузли з ВВКМ забезпечують економію електричної енергії на 8...10 % та збільшення ресурсу роботи агрегатів до 15%.

Запропоновано удосконалення структури фрикційних матеріалів, яка дозволила стабілізувати коефіцієнти тертя як в умовах сухого так і рідинного тертя. В умовах рідинного тертя коефіцієнт тертя фрикційних накладок гальмівних колодок дискових вузлів гальмування легкових автомобілів підвищився з 0,22 до 0,27. Проведена їх дослідна апробація для гальмівних колодок дискових гальм автомобілів. (Акт від **16.09.2011р**, ОАО «Укрграфіт»).

Результати роботи пройшли дослідну апробацію і впровадження на ВАТ «Укрграфіт», ДЗ «Вуглекомполімер», УкрНДІТМ. (Акт від **12.12.2014р.**, УкрНДІТМ).

Загальні науково-методичні і прикладні результати увійшли до навчального посібника з грифом МОНУ і знайшли використання в учбовому процесі Запорізької державної інженерної академії в лекційних курсах і проведенні практичних занять при підготовці бакалаврів, фахівців і магістрів по дисципліні "Технологія вуглеграфітових і вуглецевих композиційних матеріалів» (Акт від **06.10.2014р**).

Особистий вклад здобувача. Всі дослідження виконано при особистій участі автора, результати яких викладено в цій дисертаційній

роботі. При цьому постановка і планування експериментів, участь в проведенні вимірів і обробка їх результатів, виводи, написання статей, апробація отриманих наукових досліджень на підприємствах ВАТ «Укрграфіт», ВАТ «ДЗ Вуглекомполіт», УкрНДІТМ є особистим вкладом автора в рішення поставленої задачі.

Апробація результатів роботи. Основні матеріали дисертації докладалися на міжнародних наукових конференціях: “Матеріали для роботи в екстремальних умовах” (м.Київ, 2015, 2016 р.); “Комп’ютерне моделювання в хімії і технологіях та системах сталого розвитку – КМХТ 2016” (м.Київ, 2016 р.); «Машини і пластична деформація металів» (м. Запоріжжя, 2012р.); «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 2012р.); «Стратегія якості в промисловості і освіті» (м. Варна, 2012р.); «Сучасна наука: Теорія і практика» (м. Запоріжжя, 2012р.); «Vedecky prkrok na prelomu tisyachalety - 2012» (Praha, 2012р.); «Математические методы в технике и технологиях» (г. Саратов, 2011р., 2012р.); «Альянс наук: Вчений вченому» (м. Дніпропетровськ, 2010р., 2011р.); «Nankowa mysl informacyjnego wieku – 2010» (Prezemyśl, 2010р.); «Композиционные материалы в промышленности» (м. Ялта, 2003, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010рр.); «Компьютерне моделювання в хімії та технологіях і сталий розвиток» (м. Київ, 2010р.); «Передовые космические технологии на благо человечества» (м. Дніпропетровськ, 2009р.); «Сучасне матеріалознавство: матеріали та технології (СММТ - 2008)» (м. Київ, 2008р.); «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании» (м. Одеса, 2008р.); Всероссийская конференция по наноматериалам «НАНО - 2007» (м. Новосибирськ, 2007р.); Международный конгресс «ОТТОМ - 8» (м. Харків, 2007р.); «Актуальные проблемы трибологии» (м. Москва – м. Самара, 2007р.); «Вакуумные нанотехнологии и оборудование» (м. Харків, 2006р.); «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследование, применение, экологические чистые технологии производства и утилизации изделий» (Жуковка, 2006р.); «Современные научные достижения - 2007» (м. Дніпропетровськ, 2006р.); «Современное материаловедение: достижения и проблемы MMS – 2005» (м. Київ, 2005р.); «Проблеми математичного моделювання» (м. Дніпропетровськ, 2004р.); «Науковий потенціал світу «2004» (м. Дніпропетровськ, 2004р.); «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий» (м. Кацевеллі, 2004р.); Международный конгресс «ОТТОМ - 4» (м. Харків, 2003р.); «Materials and coatings for extreme performances» (Katsiveli, 2002р.); «Новые технологии, методы обработки и упрочнения деталей энергетических установок» (м. Запоріжжя - Алушта, 2002р.).

Публікації. Основний зміст дисертації викладено в 3 монографіях, 36 статтях, опублікованих в наукових спеціалізованих виданнях, з них 14 у журналах, що входять до наукометричних баз даних, 25 тезах доповідей,

представлених на наукових конференціях та одному патенті України на корисну модель.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, семи розділів, висновків, списку використаних літературних джерел з 290 найменувань та 8-ми додатків. Робота викладена на 12,6 авторських аркушів, 74 рисунка, 61 таблиць, 8 додатків. Загальний об'єм дисертації - 16,3 авторських аркушів.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані мета і завдання досліджень, визначена наукова новизна і практична цінність отриманих результатів.

У першому розділі приведено аналіз відомих літературних даних по методах формування триботехнічних характеристик композиційних матеріалів на основі вуглецю, впливу технологічних параметрів на властивості вуглепластиків, впливу процесу високотемпературної обробки на структурно-механічні характеристики карбонізованих вуглепластиків, методів і процесів ущільнення пористої структури карбонізованих вуглепластиків з газової фази, заповненню пористої структури високотемпературними розплавами і водними суспензіями.

Питаннями тертя і процесами, які його супроводжують, займалися учені, починаючи від Леонардо да Вінчі, Ломоносова, Амонтонна, Кулона і Ейлера. Продовжили дослідження процесів тертя Д.І. Менделєєв, Н.Є. Жуковський, С.А. Чаплигін, П.А. Ребиндер, А.С. Ахматов, А.К. Зайцев, Б.В. Дерягин, І.В. Крагельський, Ф. Броуден, Д. Тейбор, М. Амбрустер, Н. Краузе, Г. Фляйшер, Р. Марчак і багато інших.

Сучасні проблеми тертя і зносу розглянуті в роботах А.В. Чичинадзе, Б.І. Костецького, Д.М. Гаркунова, Ю.К. Машкова, А.Г. Касторнова, Ю.М. Солоніна, И.М. Федорченко, Э.Д. Брауна, Н.А. Буше, Л.И. Погодаєва, Г.П. Шпенькова, И.Г. Горячевой, Ю.С. Уржумцева, А.Г. Кузьменко та інші.

У відомих роботах досліджені питання сухого тертя металів і сплавів, полімерних матеріалів, композиційних полімерних антифрикційних і фрикційних матеріалів, неорганічних композиційних матеріалів. Найбільш перспективними є композиційні матеріали на основі вуглецевих волокон, полімерних, вуглецевих і керамічних матриць. Триботехнічні характеристики, методи формування їх структури і компонентного складу досліджені недостатньо повно і науково обґрунтовано.

В роботах В.І. Костікова, С.А. Колесникова, В.А. Гуріна, М.І. Рогайліна, С.П. Половнікова, Б.І. Бондаренко, А.С. Фіалкова, А.Б. Миткевича, В.Я. Варшавського, О.Г. Циплакова, Ю.В. Соколкіна, А.О. Ташкінова, П.А. Теснера, Р.З. Магаріла, А.М. Тимофєєва, О.М. Вотінова, В.Д. Вороб'я, Ю.М. Бушуєва і багатьох інших викладено науково-технічні і технологічні питання отримання вуглепластикових заготовок, процесів

карбонізації і газофазного ущільнення пористої структури, досліджені їх фізико-механічні і функціональні властивості.

Наукові основи високотемпературних процесів, профілізації пористої структури карбонізованих вуглепластиків і формування експлуатаційних властивостей ВВКМ вимагають подальшого вдосконалення і розробки.

Для отримання вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів в якості зв'язуючого використовуються фенолоформальдегідні смоли, що мають коксовий залишок в межах 50 - 60%, низьку вартість і вдале поєднання експлуатаційних властивостей.

Для фенолоформальдегідних смол недостатньо вивчено процес отвердіння, не визначено кінетичні параметри процесу отвердіння.

Практично не освітлюються питання впливу швидкості нагріву і захисного середовища на пружні, міцнісні і теплофізичні характеристики вуглець - полімерних композитів в процесі карбонізації.

Проведено аналіз методів рідкофазного заповнення пористої структури карбонізованих вуглецевих композитів розплавом кремнію. Відомі методи заповнення пористої структури ВВКМ рідким кремнієм представляються у вигляді однієї стадії, не встановлені температурні межі стадії просочення і стадії карбідоутворення.

Найбільш наукомісткою стадією виробництва ВВКМ є газофазне ущільнення пористої структури карбонізованих вуглепластиків з газової фази. Проведено математичний аналіз термоградієнтного і ізотермічного методів ущільнення в умовах стаціонарного процесу, пульсуючого тиску реакційних газів і вимушеної конвекції. Встановлено, що пульсуючий тиск реакційних газів не прискорює процес ущільнення, умови вимушеної конвекції технологічно важко здійснити. Для тонкостінних заготовок з карбонізованих вуглепластиків з двостороннім підведенням реакційних газів є переважно ізотермічний метод, а для товстостінних заготовок - термоградієнтний.

Вдосконалення методів розрахунку технологічних параметрів процесу ущільнення пористої структури карбонізованих заготовок з вуглепластика забезпечує можливість підвищення якісних характеристик ВВКМ і збільшення виходу придатної продукції.

Дослідження в перерахованих маловивчених напрямках технології отримання ВКМ, оцінки їх фізико-механічних і триботехнічних властивостей, встановлення механізмів впливу на ці властивості структурного і компонентного складу лягли в основу справжньої дисертаційної роботи.

В другому розділі наводяться відомості про матеріали і методики дослідження. В якості початкових матеріалів використовувалися вуглецеві волокна: «УКН-5000», «ВМН-4», «ВМВ»; графітовані вуглецеві тканини: «ТГН-2М», «Урал Т-22», «ЭТАН».

В якості матриці використовувалася новолачна фенолоформальдегідна смола СФ – 010 (ГОСТ 18634 – 80) з

отверднувачем (гексаметилентетрамін (ГМТА) ГОСТ 4381 – 83Е) і розчинником (етилловий спирт ГОСТ 5964 – 82), а також резольна смола марки ЛБС – 20 (ГОСТ- 901-78).

Для просочення ВКМ використовувався технічний кремній марок КР00, КР0 (ГОСТ 2169 – 69 і ТУ 48 – 5 – 220 – 81), фторопластова суспензія на основі мікропорошку Ф4.

Для прогнозування коефіцієнтів тертя розроблено метод, заснований на представленні композиційних матеріалів середовищем класу В₂, в якому вводяться елементи першого і другого порядку малості. На елементах першого порядку малості задаються властивості композиту, на елементах другого порядку - властивості компонентів композиту.

Вдосконалена методика по прогнозуванню пружних, міцностних характеристик, коефіцієнтів лінійного температурного розширення і теплопровідності.

Розроблена методика визначення вмісту піровуглецю по товщині ущільнених ВВКМ з газової фази.

Розроблена методика дослідження ерозійної стійкості ВВКМ в високоенергетичних потоках газу.

Механічні випробування ВКМ проводилися по ГОСТ 25.601–80 і по ГОСТ 25.604–82.

У третьому розділі розроблено технологічні методи формування щільності, вміст та розподіл зв'язуючого по об'єму вуглепластика, забезпечення заданої міри отвердіння, меж міцності і зниження дефектності в процесі отримання вуглепластиків на основі вуглецевих волокнистих наповнювачів і комбінованих зв'язуючих, що містять самозмащуючі компоненти.

Найбільш важливим етапом отримання вуглепластикових заготовок, що формуються методом спірального намотування, є режим автоклавного отвердіння. Автоклавне отвердіння припускає вакуумування об'єму композиту, що отверджується, забезпечення заданого контактного тиску газовим середовищем і ступінчастий графік температурного режиму. Швидкість підйому температури робочого газу автоклава аеродинамічного нагріву і заготовки, що отверджується з комплексом технологічного оснащення значно відрізняється. З метою компенсації різниці швидкостей запропонована адаптаційна модель управління температурним режимом, яка враховує передісторію процесу нагріву. Температура в заготівлі, що отверджується визначається:

$$T_u(t) = A(P) \cdot T_a(t) + \int_0^t k(t-\tau) \frac{\partial T_a(\tau)}{\partial \tau} d\tau, \quad (1)$$

де $T_u(t)$, $T_a(t)$ - відповідно температура виробу і автоклава на момент часу t ; $A(P)$ - регресійний коефіцієнт, залежний від тиску P в автоклаві; $k(t-\tau)$ - функція, яка враховує вплив передісторії нагріву автоклава на температуру виробу.

Адаптаційні коефіцієнти $A(P)$ уточнюються по спеціально розробленому алгоритму, який враховує нев'язку по різниці температур

розрахованої і вимірної в заготовці на поточний момент часу по термопарі градування ХК, встановленої в тілі заготовки, що отверджується.

Розроблена модель і алгоритми її застосування забезпечують точність відпрацювання температурного режиму отвердіння вуглепластикових заготівель в межах технологічного допуску ± 3 К.

Отвердження вуглепластикова заготовки контролюється за наступними характеристиками, які визначають її якісні параметри: щільність заготовки (θ_1), 1240 - 1350 кг/м³; вміст матричного матеріалу (θ_2), 35 - 40 %; ступінь отвердіння (θ_3), 94 - 97 %; загальний об'єм розшарувань (θ_4), $\leq 25 \cdot 10^{-4}$ см²; межа міцності на зсув (θ_5), $8,2 \pm 0,4$ МПа.

Для кількісної оцінки якісних параметрів заготовок побудована регресійна модель, яка представлена у вигляді:

$$\theta_K = B_0^K + \sum_{i=1}^N B_i^K x_i \quad (2)$$

де N – кількість контрольованих технологічних параметрів; x_i – технологічні параметри; B_0^K, B_i^K – регресійні коефіцієнти; K – номер параметра якості.

Кількісні значення параметрів моделі (2) представлено в таблиці 1. Для всіх отриманих рівнянь розрахункові значення критерію Фішера F_p не перевищують табличні значення F_T .

Таблиця 1

Значення регресійних коефіцієнтів

| Параметри якості | X ₀ | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ | X ₅ | X ₆ | X ₇ | Критерій Фішера | |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|
| | B ₀ | B ₁ | B ₂ | B ₃ | B ₄ | B ₅ | B ₆ | B ₇ | F _p | F _T |
| θ_1 | 1,833 | 0,666 | -0,663 | 0,663 | 0,634 | -0,667 | -0,661 | -0,612 | 6,584 | 8,4 |
| θ_2 | -7,365 | 0,144 | 0,696 | -2,825 | -7,126 | -0,362 | 0,329 | 0,643 | 3,857 | 5,6 |
| θ_3 | 86,974 | -0,661 | 0,272 | 6,153 | -1,874 | -1,828 | 0,694 | -0,267 | 1,638 | 4,3 |
| θ_4 | -26969 | 85,953 | 126,45 | 7641,88 | 1678,33 | 131,35 | -32,669 | -145,678 | 9,324 | 12,7 |
| θ_5 | 16,651 | 0,0211 | -0,1186 | 1,4818 | -0,3262 | -0,1626 | -0,0289 | 0,0466 | 2,176 | 6,8 |

В таблиці 3.1 технологічні параметри мають значення: x_1 – в'язкість зв'язуючого, 70...100 с; x_2 – нанос зв'язуючого, 45 ± 5 %; x_3 – питома натягнення, 8...12 %; x_4 – залишковий тиск вакуумування $0,005 \pm 0,001$ МПа; x_5 – час витримки, $0,25 \pm 0,03$ год/мм; x_6 – час подачі тиску, 2,5...3,0 год.; x_7 – максимальний тиск в автоклаві, $1,1 \pm 0,1$ МПа.

З метою формування антифрикційних властивостей вуглепластика в матричний матеріал вводили самозмащуючий компонент – терморозширений графіт (ТРГ). В якості зв'язуючого використовували спиртовий розчин смоли новолачного типу СФ – 010 з отверджувачем ГМТА. В якості волокнистого наповнювача використовували вуглецеве волокно ВМН – 4, вуглецеве волокно, яке апретоване фторопластом Ф4 – ВМВ, вуглецеву графітовану тканину ТГН – 2М.

Для всіх серій зразків вуглепластика визначено межі міцності на стиск (82...198 МПа), межі міцності на вигин (49...132 МПа), модулі пружності (8...15 ГПа), щільність (1240...1660 кг/м³), пористість (0,16...3,69 %). На рис. 1а, б представлена залежність коефіцієнтів тертя від вмісту у вуглепластику ТРГ, а на рис. 1в - лінійний знос.

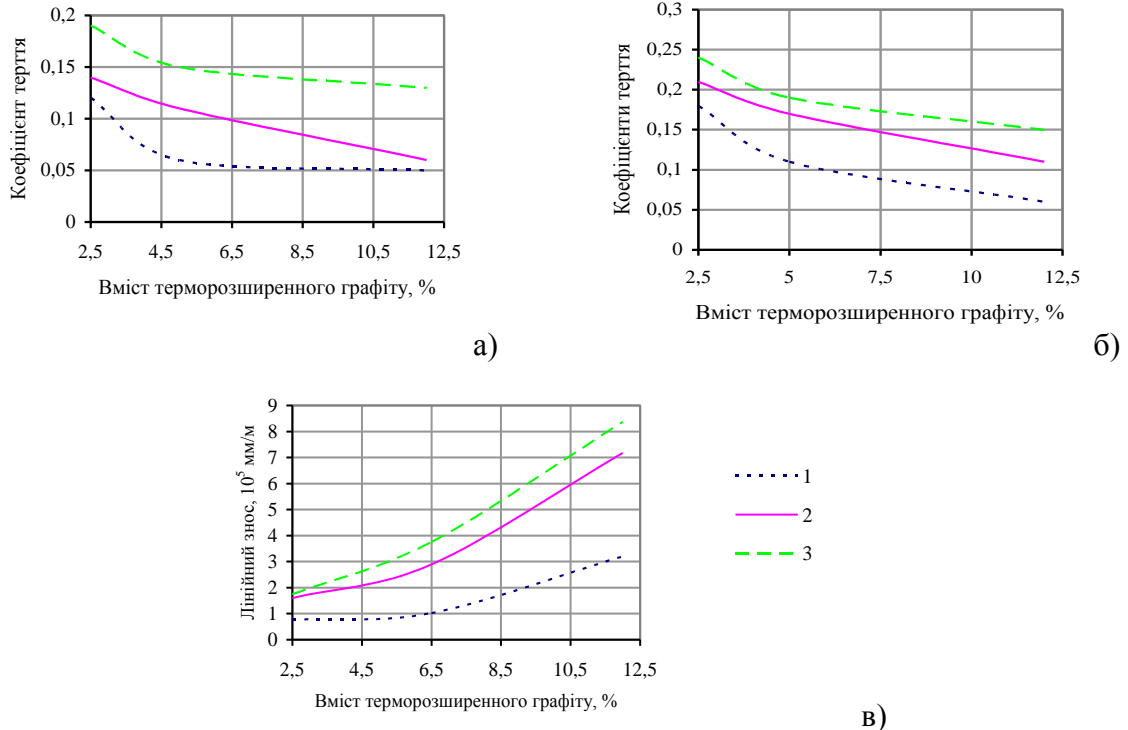


Рис. 1 Вплив терморозширеного графіту на коефіцієнти тертя і інтенсивність зносу вуглепластиків: а) - при температурі 323 К, б) – при температурі 373 К, в) – лінійний знос; 1 – на основі ВМН – 4, 2 – на основі ВМВ, 3 – на основі ТГН – 2М.

Розглядається один з видів антифрикційних композиційних матеріалів вуглець - фторопласти, отримані на основі вуглецевих волокнистих наповнювачів і фторопластової матриці.

Технологія отримання вуглець - фторопластових матеріалів (ВФМ) припускає отримання препрега шляхом просочення армуючих вуглецевих волокнистих наповнювачів водною суспензією фторопласту з подальшим процесом сушки, гарячого пресування при температурі 523...553 К і питомому тиску 80...100 МПа. Склад ВФМ представлено в таблиці 2.

Таблиця 2

Вуглець - фторопластові композити

| Марка | Наповнювач | | Матриця | | Щільність, г/см ³ |
|---------|----------------------------|----------|---------------|----------|------------------------------|
| | Вид | Вміст, % | Вид | Вміст, % | |
| ВФМ – 1 | Вуглецеві волокна ВМН - 4 | 72 | Фторопласт Ф4 | 28 | 1,66 |
| ВФМ – 2 | Вуглецева тканина ТГН – 2М | 68 | Фторопласт Ф4 | 32 | 1,65 |

Вміст фторопласту Ф4 в ВФМ - 2 вище, ніж в ВФМ - 1 пояснюється більшою пористістю структури тканини ТГН - 2М відносно джгута вуглецевих волокон ВМН - 4.

Триботехнічні характеристики ВФМ представлено в таблиці 3.

Таблиця 3

Триботехнічні властивості вуглець - фторопластових композитів

| Марка | Швидкість ковзання, м/с | Питомий тиск, МПа | Коефіцієнт тертя | | Зношення, мкм/км |
|---------|-------------------------|-------------------|------------------|------------|------------------|
| | | | Дослід | Розрахунок | |
| ВФМ – 1 | 2,80 | 5,70 | 0,09 | 0,083 | 5,80 |
| | 8,40 | 3,20 | 0,06 | 0,064 | 4,60 |
| ВФМ – 2 | 2,80 | 5,20 | 0,09 | 0,087 | 4,90 |
| | 8,40 | 3,00 | 0,05 | 0,06 | 4,10 |

Дослідні значення коефіцієнтів тертя визначено за схемою диск-колодка, розрахункові значення, які отримано по методу, заснованому на рішенні статистичної крайової задачі мікромеханіки неоднорідних середовищ.

Вуглець - фторопластові композити мають високу хемостійкість по відношенню до кислот, лугів і органічних розчинників.

В якості прикладу в таблиці 4 представлено значення міцності на стискування ВФМ після витримки 1300 і 2200 годин в 50 % розчині азотної кислоти при кімнатній температурі.

Фактичне зниження межі міцності на стиск за час випробувань не перевищує 2,9 %.

Впродовж витримки до 1200...1300 годин відбувається зниження маси зразків ВФМ, а при подальшій витримці відбувається набрякання зі збільшенням маси.

Таблиця 4

Міцність композиту на стиск після витримки в HNO_3 з концентрацією 50 %, МПа

| Матеріал | Напрямок пресування | 0 годин | 1300 годин | 2200 годин |
|----------|---------------------|---------|------------|------------|
| ВФМ – 1 | ⊥ | 17,04 | 16,77 | 16,58 |
| | // | 49,68 | 48,78 | 48,30 |
| ВФМ – 2 | ⊥ | 12,96 | 12,72 | 12,59 |
| | // | 45,42 | 44,54 | 44,10 |

На рис. 2 представлено криві зміни маси ВФМ протягом 2000 годин в 50% водних розчинах HNO_3 , HCl , H_2SO_4 . Як видно з кривих, представлених на рис. 2, зміна маси ВФМ має екстремальний характер.

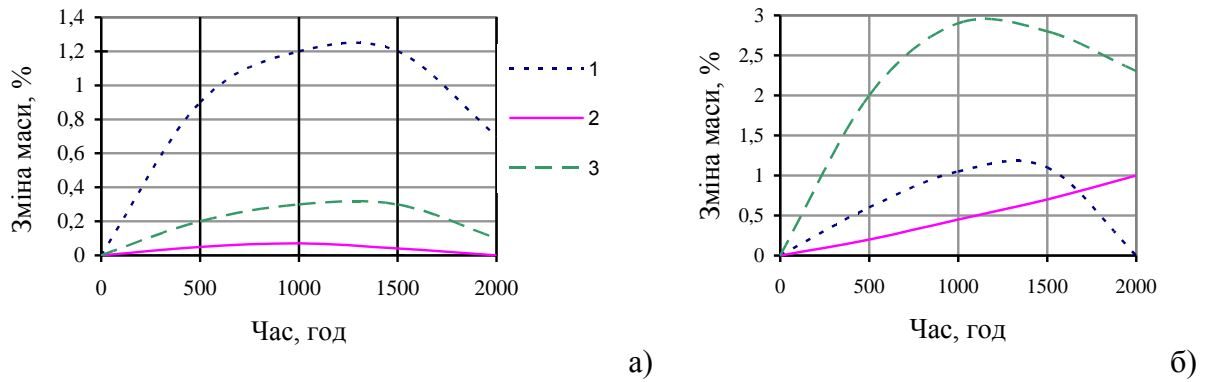


Рис. 2 Зміна маси ВФМ при дії агресивних середовищ
а) – ВФМ – 1; б) – ВФМ – 2; 1 – HNO_3 ; 2 – HCl ; 3 – H_2SO_4 ;

Розглядаються багатоконпонентні композиційні матеріали фрикційного типу, до яких пред'являються специфічні вимоги по стабільності коефіцієнтів тертя в заданому діапазоні температур і вологості, зносостійкості і твердості.

Енергія гальмування витрачається на нагрів в зоні тертя і знос поверхонь, що труться. У зв'язку з цим в композиційний фрикційний матеріал вводяться компоненти, що мають високі коефіцієнти теплопровідності. Для зниження інтенсивності зносу вводяться компоненти, що мають високу зносостійкість. За стабільність коефіцієнтів тертя в заданому температурному інтервалі відповідають спеціальні компоненти і матричний матеріал. Стабільність коефіцієнтів тертя в умовах підвищеної вологості забезпечуються введенням в структуру композиту препрега на основі мікропорошку технічної гуми і фенолоформальдегідного зв'язуючого (СФ-010+ГМТА).

На рис. 3 представлено коефіцієнти тертя в умовах сухого і рідинного тертя залежно від вмісту препрега.

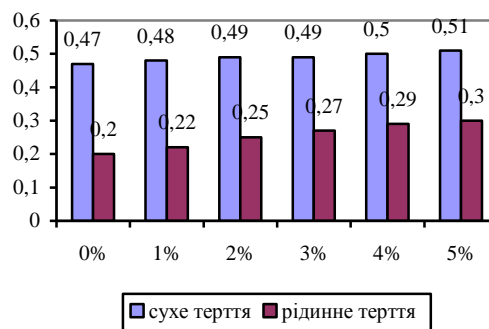


Рис. 3 Порівняльна залежність коефіцієнтів тертя від вмісту препрега в умовах сухого і рідинного тертя.

В умовах рідинного тертя введення препрега до 5 % підвищує коефіцієнт тертя з 0,2 до 0,3.

Збільшення долі препрега в структурі фрикційного елемента обмежене зниженням твердості до мінімально - допустимого значення. Цьому значенню відповідає граничний вміст препрега – 4 %.

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.

Відмінною рисою постановки крайової задачі є введення в узагальнений закон Гуку двох випадкових функцій. Одна функція задає зміну пружних характеристик компонентів композиту в процесі термохімічних перетворень. Друга функція встановлює залежність термохімічної усадки компонентів в інтервалі температур від 473 до 1073 К.

Випадкові функції термоструктурних перетворень модулів пружності та усадок компонентів композиту задаються моментами розподілу першого і другого порядку.

Для оцінки моментів розподілу випадкових функцій термохімічних перетворень визначаються середні значення і дисперсії випадкових мікронапруг в компонентах композиту. Вірогідність появи мікроушкоджень в компонентах композиту оцінюється виходом випадкових мікронапруг, діючих в компонентах, за граничні значення. Накопичення мікроушкоджень описується функцією, залежною від рівня діючої температури.

Моментні функції розподілу мікроструктурних усадок компонентів композиту визначаються експериментальним шляхом. З цією метою фіксуються лінійні усадки компонентів композиту в процесі підйому температури.

На рис. 4 та рис. 5 представлено експериментальні криві лінійної усадки отвердженної фенолоформальдегідної смоли та зміна міцностних характеристик.

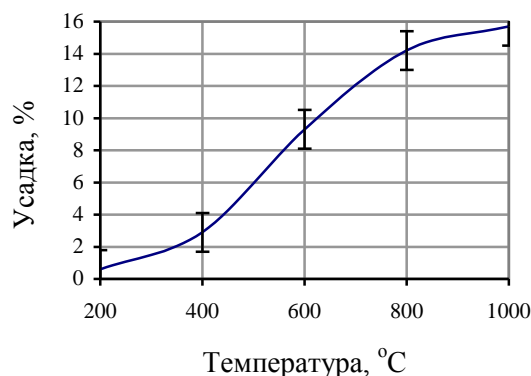


Рис. 4 Зміна лінійної усадки отвердженної феноло-формальдегідної смоли (ЛБС-20) в процесі карбонізації.

За даними кривих представлених на рис. 4 та рис. 5 визначено параметри термоусадочних і термоструктурних функцій.

Проведено розрахунки фізико-механічних характеристик вуглецевих композитів в процесі карбонізації. Результати розрахунків представлено в таблиці 5. 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, параметри кривої представлені в таблиці 6.

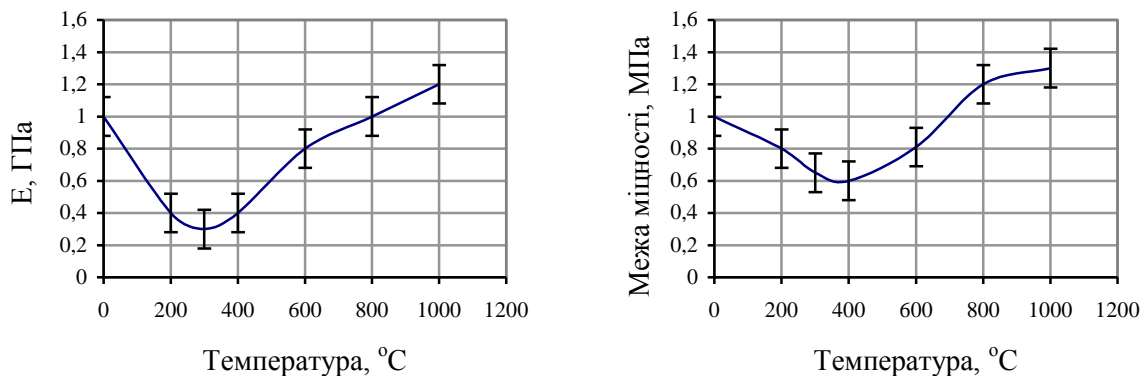


Рис. 5 Відносна зміна пружних і міцностних характеристик отвердженої фенолоформальдегідної смоли (ЛБС - 20) в процесі карбонізації.

Триботехнічні характеристики карбонізованих вуглецевих композитів, армованих волокнами ВМН-4 під кутом ± 30 вугл. градусів до координати x_1 , представлені в таблиці 7. Коефіцієнти тертя і інтенсивність зносу визначалися на машині тертя СМТ-1М по системі диск - колодка. Швидкість ковзання 3,0 м/с, питомий тиск 1,5 МПа.

Таблиця 5

Залежність властивостей вуглепластика (ВМН-4+СФ-010) від температури карбонізації для різних схем армування

| Т, К | Армування вугл. град. | E_{11} , МПа | E_{22} , МПа | σ , МПа | μ_{12} | μ_{21} | КТЛР $\cdot 10^6$, 1/К | | |
|------|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------|------------|-------------------------|------------|------------|
| | | | | | | | α_1 | α_2 | α_3 |
| 293 | 0:90 | 11844 | 11844 | 99,1 | 0,1 | 0,1 | 1,7 | 1,7 | 3,6 |
| 573 | | 10463 | 10463 | 96,5 | 0,069 | 0,069 | 6,1 | 6,1 | 11,9 |
| 873 | | 10591 | 10591 | 88,8 | 0,045 | 0,045 | 1,0 | 1,0 | 2,0 |
| 1073 | | 11126 | 11126 | 94,2 | 0,066 | 0,066 | -2,3 | -2,3 | 4,6 |
| 293 | 45:45 | 1379 | 1379 | 78,2 | 0,89 | 0,89 | 1,7 | 1,7 | 3,6 |
| 573 | | 982,3 | 982,3 | 72,9 | 0,91 | 0,91 | 6,1 | 6,1 | 11,9 |
| 873 | | 1120 | 1120 | 73,3 | 0,89 | 0,89 | 1,0 | 1,0 | 2,0 |
| 1073 | | 1246,5 | 1246,5 | 77,3 | 0,89 | 0,89 | -2,3 | -2,3 | 4,6 |
| 293 | 0 | 21159 | 2015 | 188,6 | 0,055 | 0,57 | 0,13 | 3,6 | 3,6 |
| 573 | | 19397 | 1153 | 178 | 0,036 | 0,61 | 0,29 | 11,9 | 11,9 |
| 873 | | 20105 | 838 | 175 | 0,023 | 0,56 | 0,71 | 2,0 | 2,0 |
| 1073 | | 20570 | 1363 | 197,6 | 0,035 | 0,53 | 0,37 | -4,6 | -4,6 |
| 293 | 90 | 2015 | 21159 | 18,1 | 0,57 | 0,058 | 3,6 | 0,14 | 3,6 |
| 573 | | 1154 | 19397 | 14,9 | 0,61 | 0,036 | 11,9 | 0,29 | 11,9 |
| 873 | | 838 | 20105 | 5,0 | 0,56 | 0,023 | 2,0 | 0,71 | 2,0 |
| 1073 | | 1363 | 20570 | 11,9 | 0,53 | 0,035 | -4,6 | 0,37 | -4,6 |

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.

Таблиця 6

Параметри пористої структури карбонізованих ВКМ

| Номер діапазону | Мінімальний радіус, мкм | Максимальний радіус, мкм | Середній радіус, мкм | Доля пор, % |
|-----------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|-------------|
| 1 | 0,001 | 0,030 | 0,0085 | 32 |
| 2 | 0,030 | 2,500 | 0,713 | 38 |
| 3 | 2,500 | 13,000 | 3,850 | 19 |
| 4 | 13,00 | 200,00 | 26,5 | 11 |

Таблиця 7

Коефіцієнти тертя і знос карбонізованого ВКМ

| Характеристика | Напрямок площини тертя до осі x_l | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|------|------|------|
| | 0 | 30 | 60 | 90 |
| Коефіцієнт тертя | 0,16 | 0,21 | 0,17 | 0,13 |
| Лінійний знос 10^5 , мкм/м | 1,80 | 3,70 | 1,90 | 1,60 |

Перенесення діоксиду вуглецю по довжині пори за рахунок дифузії описується рівнянням:

$$\frac{d^2C}{dl^2} = \frac{2k}{D \cdot r} f(c) \quad (3)$$

де C – концентрація CO_2 ; k – константа швидкості газифікації вуглецю; D – коефіцієнт дифузії CO_2 у суміші газів; $f(c)$ – концентраційна функція; l – координата по довжині пори, r – радіус пори.

Граничні умови для рівняння (3) запишуться у виді:

$$C|_{l=0} = C_0; \quad (4)$$

$$\frac{dC}{dl}|_{l=h} = 0, \quad (5)$$

де C_0 – концентрація CO_2 на поверхні ВВКМ; h – половина товщини стінки.

Рішення рівняння (3) з умовами (4) і (5) задає розподіл концентрації CO_2 по довжині пори:

$$C = \frac{C_0}{1 + e^{-2Kh}} (e^{-Kl} + e^{K(l-2h)}) \quad (6)$$

$$\text{де } K = \sqrt{\frac{2k}{D \cdot r}}.$$

Рішення (6) застосовне для пор, що належать кожному локальному максимуму на кривій порограми (таблиця 6).

Диференційне рівняння перенесення реакційних газів по довжині циліндричного реактора з урахуванням його реакції на нагрітих поверхнях пористої структури:

$$\frac{d(C \cdot U)}{dx} = -2k \cdot \beta \cdot C \cdot \left[\frac{1}{R[\beta + k \cdot (1 - q_n) + q_n \cdot \pi \cdot \sum_{i=1}^N \Omega_i]} \right], \quad (7)$$

де U – швидкість потоку реакційного газу; R – радіус реактора; q_i – доля пористості поверхні композиту; β - коефіцієнт масопровідності;

$$\Omega_i = r_i^2 \cdot D_i \cdot K_i \cdot p_i \cdot \left[\frac{1 - \exp(2K_i \cdot h)}{1 + \exp(-2K_i \cdot h)} \right].$$

Реакція газифікації записується у виді:



Для реакції (8) розподіл реакційних газів по довжині реактора з урахуванням ступеня розкладання CO_2 , заданою α , запишеться:

$$\begin{aligned} C_{CO_2} &= C_{CO_2}^{ex} (1 - \alpha); \\ C_{CO} &= C_{CO_2}^{ex} (1 + 2\alpha); \\ U &= U_{вх} (1 + \alpha), \end{aligned} \quad (9)$$

де $C_{CO_2}^{ex}$ - концентрація CO_2 на вході в реактор; $U_{вх}$, U – швидкість подачі газів на вході і по довжині реактора.

Рівняння (7) з врахуванням (9) матиме вигляд:

$$\frac{3\alpha}{1 - \alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dx} + \gamma = 0; \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{k \cdot \beta}{U_{вх}} \cdot \left[\frac{1}{R[\beta + k \cdot (1 - q_n) + q_n \cdot \pi \cdot \sum_{i=1}^N \Omega_i]} \right]. \quad (11)$$

З рішення (10) ступінь розкладання CO_2 визначиться:

$$\alpha(x) = \sqrt{2\gamma \cdot x}. \quad (12)$$

Після визначення швидкості газового потоку на виході з реактора, граничний ступінь розкладання діоксиду вуглецю буде задано співвідношенням:

$$\alpha(L) = \frac{U_{вхL}}{U_{вх}}, \quad (13)$$

де L – довжина реакційної зони.

З рішення (12) з врахуванням (13) коефіцієнт масопровідності визначиться:

$$\beta = \frac{\alpha^2(L) U_{вх} R (k(1 - q_n) - \pi \cdot q_n \sum_{i=1}^N \Omega_i)}{2kL - \alpha^2(L) U_{вх} R}. \quad (14)$$

У рішеннях (6), (12) і (14) використовується константа швидкості газифікації різних форм вуглецю в середовищі діоксиду вуглецю. Проведено експериментальне визначення кінетичних параметрів газифікації скловуглецю (СВ), піровуглецю (ПВ) і технічного вуглецю (ТВ). Для константи швидкості газифікації, заданої у формі Ареніуса, значення енергії активації і передекспоненти представлені в таблиці 8.

Кінетичні параметри газифікації вуглецевих матеріалів

| Матеріал | Од. виміру | ПВ | СВ | ТВ |
|---------------------------------|------------|-------|--------|---------|
| Енергія активації, E | Дж/моль | 44064 | 72285 | 3126 |
| Передекспонента, k ₀ | 1/м*с | 0,96 | 4484,9 | 0,00036 |

На рис. 6 а) представлено розподіл діоксиду вуглецю по довжині пор, а на рис. 6 б) - зміна відношення початкового радіусу пори до поточного значення по товщині стінки композиту для середніх значень радіусів по чотирьох локальних максимумах (таблиця 6).

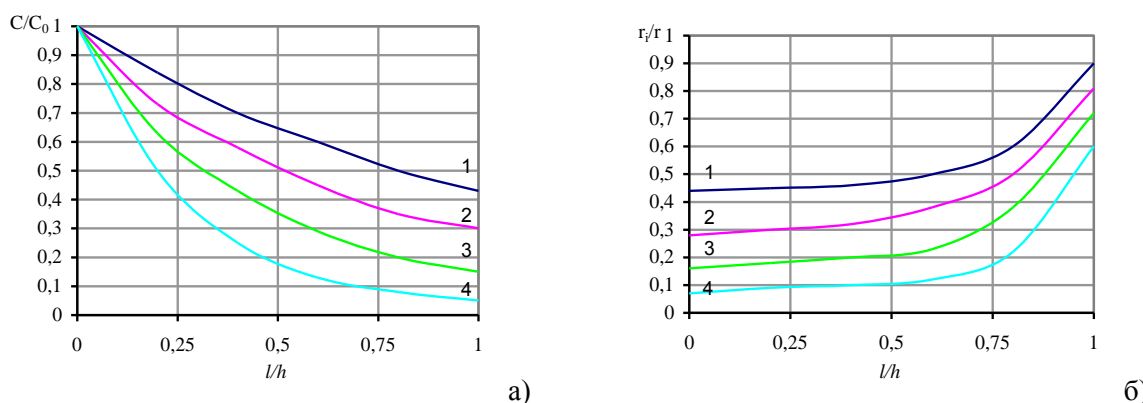


Рис. 6 Розподіл діоксиду вуглецю по довжині пор (а), залежність зміни початкового радіусу пори до поточного значення по товщині стінки композиту (б): 1 – $r_1 = 26,5$ мкм; 2 – $r_2 = 3,85$ мкм; 3 – $r_3 = 0,713$ мкм; 4 – $r_4 = 0,0085$ мкм.

З аналізу кривих рис. 6 витікає, що пори мають радіус, що збільшується, від середини товщини карбонізованих вуглецевих композитів до їх поверхні. Така форма пор найбільш прийнятна для їх заповнення піровуглецем з газової фази, розплавом кремнію або водною суспензією на основі нанопорошку фторопласту Ф4.

В п'ятому розділі представлено методи удосконалення структури карбонізованих ВКМ. Розглянуто рідкофазне 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 диференціальне 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:

$$\ell_i = \left(\frac{\omega_i}{\varphi_i} + \frac{F_i}{\varphi_i} - \frac{\omega_i}{\varphi_i^2} \right) \cdot \tau - \frac{\omega_i}{2\varphi_i} \cdot \tau^2 + \left(\frac{\omega_i}{\varphi_i^3} - \frac{F_i}{\varphi_i^2} - \frac{\omega_i}{\varphi_i^2} \right) (1 - \exp(-\varphi_i \cdot \tau)), \quad (15)$$

$$\text{де } \varphi_i = \frac{2\mu}{r_i^2 \cdot \rho}; \quad \omega_i = -g - \frac{P_{ocm}}{\ell_0 \cdot \rho}; \quad F = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{r_i \cdot \rho};$$

ℓ_i – глибина проникнення розплаву кремнію по порі в i -тому локальному максимумі; ρ , μ , σ – щільність, в'язкість і поверхневе натягнення розплаву кремнію відповідно; $P_{ост}$ – залишковий тиск вакуумування; ℓ_0 – довжина пори; g – прискорення вільного падіння; θ – крайовий кут змочування; τ – тривалість просочення.

У разі просочення пористої структури розплавом кремнію відбувається взаємодія вуглецю і кремнію по реакції:



З урахуванням швидкостей хімічної реакції (16) визначаються основні параметри процесу просочення.

Маса розплаву кремнію в пористому композиті визначиться:

$$m_{Si}^{\Sigma} = \sum_{i=1}^N (r_i^{cp} + 2\tau \cdot V_{диф}) \cdot \pi \cdot r_i^{cp} \cdot \ell_i \cdot \rho \cdot R_i, \quad (17)$$

де N – число локальних максимумів на кривій розподілу пор по радіусах ($N = 4$); $V_{диф}$ – швидкість дифузії рідкого кремнію в стінку пори.

Маса вуглецю в розплаві кремнію, що знаходиться в порах:

$$m_C^{\Sigma} = \sum_{i=1}^N 2\pi \cdot r_i^{cp} \cdot \ell_i \cdot \rho \cdot V_{раст} \cdot \tau^{0.5} \cdot R_i, \quad (18)$$

де $V_{раст}$ – коефіцієнт швидкості розчинення вуглецю в рідкому кремнії.

Маса вільного кремнію в порах:

$$m_{Si} = \sum_{i=1}^N \left(r_i^{cp} - 2 \frac{M_{Si}}{M_C} \cdot V_{раст} \cdot \tau^{0.5} \right) \cdot \pi \cdot r_i^{cp} \cdot \ell_i \cdot \rho \cdot R_i, \quad (19)$$

де M_{Si} , M_C – молекулярна маса кремнію і вуглецю, відповідно.

Кількість утвореного карбіду кремнію в об'ємі ВКМ:

$$m_{SiC} = \sum_{i=1}^N 2 (V_{раст} \cdot \tau^{0.5} + V_{диф} \cdot \tau) \cdot \pi \cdot r_i^{cp} \cdot \ell_i \cdot \frac{M_{Si}}{M_C} \cdot \rho \cdot R_i. \quad (20)$$

Маса вільного вуглецю в об'ємі композиту:

$$m_C^{ce} = \sum_{i=1}^N [V - (V_i \cdot R_i - 2\pi \cdot r_i^{cp} \cdot V_{диф} \cdot R_i \cdot \ell_i \cdot \tau)] \cdot \rho_c; \quad (21)$$

$$V_i = \pi \cdot (r_i^{cp})^2 \cdot \ell; \quad R_i = \frac{V \cdot \Pi \cdot q_i}{V_i},$$

де ρ_c – пікнометрична щільність вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів; R_i – число пор в i – му локальному максимуму; r_i^{cp} – середній радіус; V , Π – об'єм і пористість зразка ВВКМ відповідно.

Хімічний склад просочених кремнієм ВКМ, визначений експериментально і розрахунками по розроблених моделях, містить карбіду кремнію 29...32 %, вуглецю 60...65 %, вільного кремнію 3...5 % і оксиду кремнію 0,9...1,2 %. Розрахункові значення відрізняються від експериментальних не більше 5 %.

Фізико-механічні характеристики силіційованих ВВКМ представлені в табл. 9.

Вакуумно-компресійне просочення відрізняється від інфільтрації додатком надмірного тиску $P_{вн}$. В цьому випадку зовнішній надмірний тиск враховується додатковим доданком до величини ω :

$$\omega = -g - \frac{P_{ост}}{l_o \rho} + \frac{P_{вн}}{l_o \rho}. \quad (22)$$

Таблиця 9

Фізико-механічні характеристики силіційованих ВВКМ

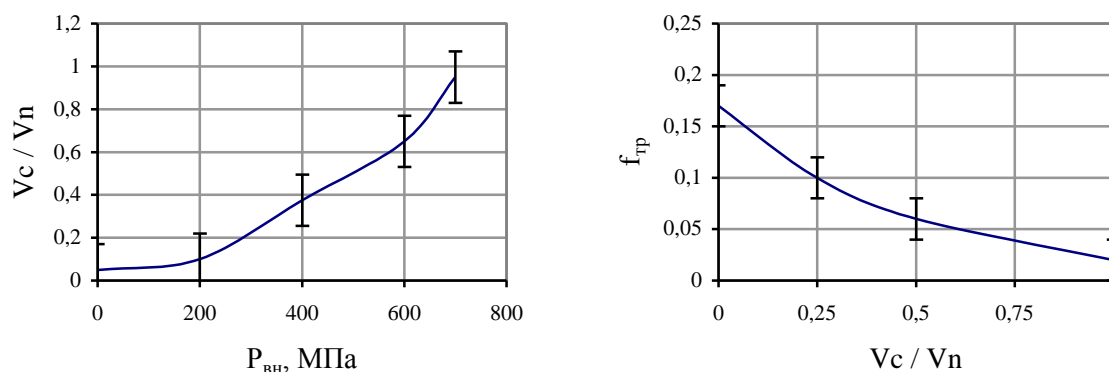
| Силіційований ВВКМ | Щільність, $\times 10^3$ кг/м ³ | Модуль пружності, ГПа | | Межа міцності на стиск, МПа | | Межа міцності на розтяг, МПа | |
|----------------------|--|-----------------------|-----------|-----------------------------|-----------|------------------------------|-----------|
| | | Розрахунок | Дослід | Розрахунок | Дослід | Розрахунок | Дослід |
| ДЗ «Вуглекомполіт» | 2,56...2,65 | 47 | 45...65 | 140 | 130...140 | 260 | 200...250 |
| Розроблений матеріал | 2,23...2,31 | 125 | 114...119 | 238 | 250...270 | 496 | 550...580 |

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%.

Для просочення використовувалося поліуретанове оснащення, в якому об'єм із зразком ВКМ, що просочується, вакуумувався до залишкового тиску 0,005 МПа і заповнювався фторопластовою суспензією.

Підготовлене оснащення поміщалося в гідростат, в якому створювався тиск просочення до 700 МПа. На рис. 7а представлена залежність відносного ступеня просочення від величини зовнішнього тиску.

Коефіцієнти тертя просочених ВКМ фторопластовою суспензією визначалися на машині тертя СМТ-1М по системі диск-колодка. Швидкість ковзання в зоні тертя складала 3,0 м/с і питомий тиск 1,5 МПа. На рис. 9б представлена залежність коефіцієнтів тертя від ступеня просочення суспензією Ф4.



а)

б)

Рис. 7 Залежність ступеня просочення від тиску а) (V_c – об'єм суспензії в пористій структурі, V_n – об'єм пор) та коефіцієнта тертя ВВКМ від ступеня просочення суспензією Ф4 б).

З аналізу даних рис. 7 б) витікає, що коефіцієнт тертя просочених ВВКМ знижується майже в 6 разів.

Карбонізований ВВКМ, просочений фторопластовою суспензією, допускається для роботи у вузлах сухого тертя при температурах до 473 К, питомих тисках до 15 МПа в умовах дії агресивного середовища.

Газофазне ущільнення в середовищі природного газу в проточному реакторі супроводжується гомогенними і гетерогенними процесами. У об'ємі ректора реалізуються реакції, які представлені на рис. 6.

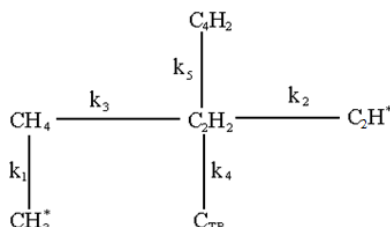


Рис. 8 Схема гомогенних процесів розкладання природного газу.

Розроблена методика і експериментально визначено константи швидкостей гомогенних процесів, представлених на рис. 8.

Кожен з реакційних газів, представлених на рис. 8, дифундує на пористу поверхню. Частина реакційних газів, що досягли пористої поверхні, дифундують в пори, інша частина газів розкладається на безпористій поверхні з осадженням твердого осаду - піровуглецю.

Реакційні гази, проникаючи в пористу структуру, розкладаються по поверхні пор з осадженням піровуглецю. За рахунок висадження піровуглецю реалізується зміна щільності по товщині стінки вуглецевого композиту.

На рис. 9 представлено розрахункові і експериментальні значення розподілу щільності по товщині піроущільненого в ізотермічних умовах вуглецевого композиту.

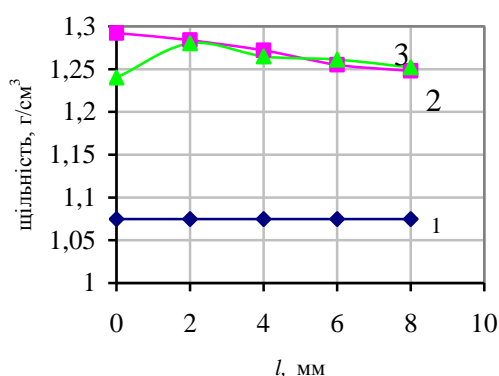


Рис. 9 Розподіл щільності по товщині ВВКМ: 1 - початкова щільність; 2 - розрахункова щільність; 3 - виміряна щільність.

Розподіл мікроструктурних параметрів і розподіл піровуглецю по товщині стінок піроущільнених ВВКМ в умовах профільованої пористості представлено на рис. 10. Вміст піровуглецю в центрі товщини стінки

складає 19%, а вміст піровуглецю в центрі товщини ВВКМ без попередньої профілізації – 14%.

Дослідним шляхом визначено коефіцієнти тертя і інтенсивність зносу піроуцільнених 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 до координати x_1 .

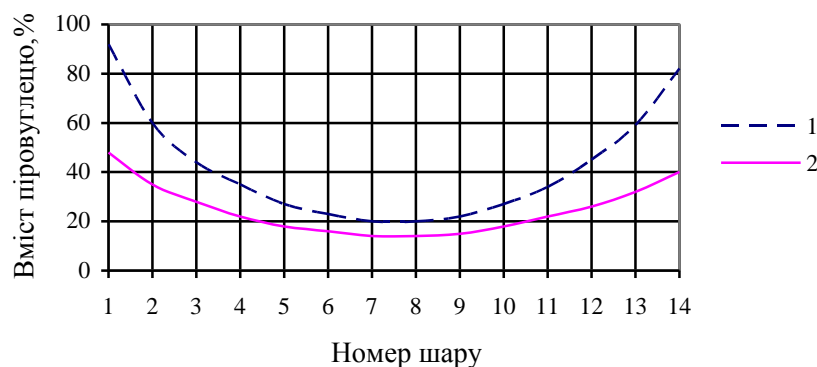


Рис. 10 Розподіл вмісту піровуглецю по товщині стінки ВВКМ (1 - з профільованою пористістю; 2 - без профілізації)

Коефіцієнти тертя залежно від кута нахилу площини тертя до осової координати армування (x_1) змінюються в межах $0,23 \dots 0,11$, а інтенсивність зносу від $2 \cdot 10^{-6}$ до $5,3 \cdot 10^{-6}$ мкм/м.

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

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

Пластинчатий пірографіт отриманий на плоских підложках, має дрібнокристалічну структуру, складену плоскими вуглецевими шарами. На рис. 11 (1) представлено вид пірографіту в площині осадження, а на рис. 11 (2) - перпендикулярно площині осадження. Така структура забезпечує фізико-механічні властивості трансверсально-ізотропного типу. У площині осадження властивості пірографіту є ізотропними і значно відрізняються від властивостей, що відповідають перпендикулярному напрямку осадження.

На об'ємних підложках осідає пірографіт об'ємного типу. Такий пірографіт має яскраво виражені конуса росту, в яких атомні вуглецеві площини мають куполоподібний вигляд. Структура об'ємного пірографіту має менший ступінь текстури і меншу схильність до розтріскування. На рис. 11 (3) наводиться вигляд макроструктури в площині осадження, а на рис 11 (4) - в площині, перпендикулярній поверхні осадження.

Структурно - механічні характеристики пірографіту визначали на установці ДРОН-2У. Міжплощинну відстань d_{002} обчислювали за формулою Вульфа – Брэгга, розміри кристалітів пірографіту визначали по ширині дифракційних ліній по співвідношеннях Селякова – Шеррера.

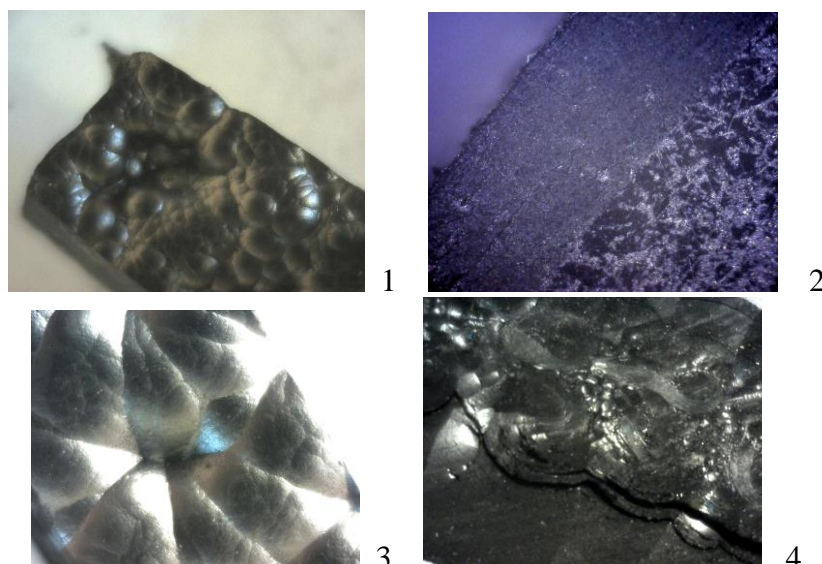


Рис. 11 Структура пірографіту : 1, 2 - пластинчатий; 3, 4 - об'ємний; 1, 3 - в площині осадження; 2, 4 - перпендикулярно площині осадження (x4).

Межа міцності на вигин зразків пірографіту визначалася по методу триточкового вигину. У таблиці 10 представлено характеристики пірографіту.

За мікроструктурними характеристиками пірографіту побудовано регресійні моделі залежності межі міцності на вигин σ_u і мікроструктурної деформації ε :

$$\sigma_u = -150,41 + 4,41L_c + 48,37d_{002} + 22,36\varepsilon - 17,92d_{002}^2 - 10,06\varepsilon^2 - 0,023L_c^2, \quad (28)$$

$$\varepsilon = 1,7615 + 0,0013L_c + 0,3300d_{002} + 0,516 \cdot 10^{-5}L_c^2 - 0,1360d_{002}^2 - 0,0014L_c \cdot d_{002} \quad (29)$$

Адекватність моделей (28) і (29) оцінювалася за критерієм Фішера. Значущість коефіцієнтів оцінювалася за критерієм Стьюдента.

Таблиця 10

Структурно-механічні характеристики піролітичного графіту

| Структурна деформація ε , % | Висота кристаліту $L_c, \cdot 10^{10}$ м | Міжплощинна відстань, $d_{002}, \cdot 10^{10}$ м | Межа міцності на вигин σ_u , МПа |
|--|---|---|--|
| 0,643 | 88,0 | 3,4227 | 26,0±3,4 |
| 0,600 | 97,0 | 3,4270 | 13,4±2,7 |
| 0,610 | 88,0 | 3,4313 | 24,1±2,9 |
| 0,610 | 97,7 | 3,4356 | 19,4±3,1 |
| 0,652 | 84,4 | 3,4219 | 20,9±2,1 |
| 0,606 | 91,0 | 3,4356 | 17,6±2,3 |
| 0,628 | 97,6 | 3,4222 | 20,3±3,2 |
| 0,595 | 91,1 | 3,4356 | 19,2±2,5 |
| 0,561 | 89,3 | 3,4270 | 19,2±2,4 |
| 0,632 | 95,2 | 3,4270 | 21,0±2,8 |

В процесі осадження пірографіту з подальшим його охолодженням до кімнатної температури в об'ємі пірографіту формується досить висока залишкова напруга, яка обумовлює появу міжшарових тріщин. Такі тріщини виникають практично в половині зразків пластинчатого пірографіту. Для оцінки залишкової макроскопічної напруги в пластинчатому пірографіті отримано формули, що визначають нормальну напругу і напругу зсуву за величиною експериментально виміряного прогину f у центрі пластини прямокутного виду:

$$\sigma_0^{\max} = \frac{4h \cdot E \cdot f}{(1 - \mu)(a^2 + b^2)} ; \quad (30)$$

$$\tau^{\max} = \frac{9,585E \cdot h^2 \cdot f}{a^3} , \quad (31)$$

де σ_0^{\max} , τ^{\max} - максимальний рівень залишкової нормальної напруги та напруги зсуву відповідно; h - товщина пластини піролітичного графіту; E - модуль пружності в площині осадження піролітичного графіту; f - максимальний прогин в центрі пластини; μ - коефіцієнт Пуассона; a , b - ширина і товщина пластини відповідно.

Залишкова напруга визначалася на пластинках пірографіту квадратної форми із стороною 170 мм. У розрахунках за формулами (30) і (31) значення модуля пружності приймали рівними 2,9 ГПа, а коефіцієнта Пуассона - 0,27. У таблиці 11 представлено виміряні значення геометричних параметрів пластин пірографіту і розрахункові значення залишкової напруги.

З аналізу даних таблиці 11 витікає, що рівень залишкової напруги зсуву досить високий і зіставим з граничними значеннями, які знаходяться в межах 0,95...1,64 МПа.

Таблиця 11

Залишкова напруга в пластинках піролітичного графіту

| Товщина h , мм | Прогин f , мм | Нормальна залишкова напруга, σ_0^{\max} , МПа | Залишкова напруга зсуву, τ^{\max} , МПа |
|---------------------|--------------------|---|---|
| 5,40 | 5,50 | 8,17 | 0,905 |
| 5,00 | 8,05 | 11,07 | 1,138 |
| 4,40 | 6,45 | 7,81 | 0,712 |
| 5,40 | 7,20 | 10,69 | 1,188 |
| 5,00 | 7,40 | 10,17 | 1,046 |
| 5,20 | 5,25 | 7,51 | 0,803 |
| 3,60 | 5,60 | 5,54 | 0,411 |
| 5,00 | 6,70 | 9,21 | 0,950 |
| 5,30 | 6,10 | 8,89 | 0,967 |

Коефіцієнти тертя пірографіту визначалися по системі диск - колодка при питомих тисках 0,55, 0,80 та 1,50 МПа. Швидкість відносного ковзання складала 3,0 м/с.

Площина ковзання задавалася по відношенню до поверхні осадження під кутом 0, 45 та 90 кутов. градусів.

На рис. 12 а) представлено криві залежності коефіцієнта тертя від напряду площини ковзання об'ємного пірографіту, а на рис. 12 б) - пластинчатого пірографіту.

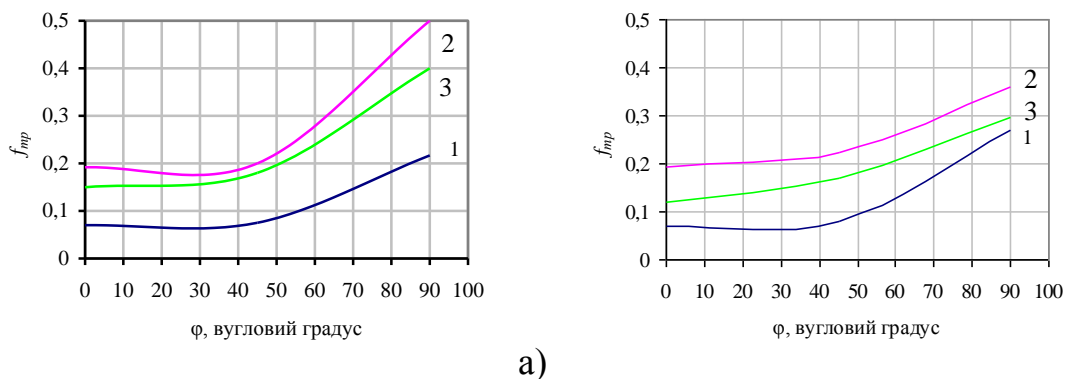


Рис. 12 Залежність коефіцієнтів тертя від напряду поверхні тертя до площини осадження об'ємного а) і пластинчатого б) пірографіту: 1 - питомий тиск 0,55 МПа, 2 – 0,80 МПа, 3 – 1,5 МПа.

Максимальне значення коефіцієнта тертя відповідає напряду площини тертя, спрямованої перпендикулярно до поверхні осадження. У цій площині пірографіт не має самозмащуючої здатності, яка характеризується зрушенням базових вуглецевих площин один відносно одного.

У розділі сім представлено спеціальні властивості та застосування ВВКМ для нагрівачів і теплових вузлів великогабаритних високотемпературних електровакуумних агрегатів, силиційованих 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 рис. 13.

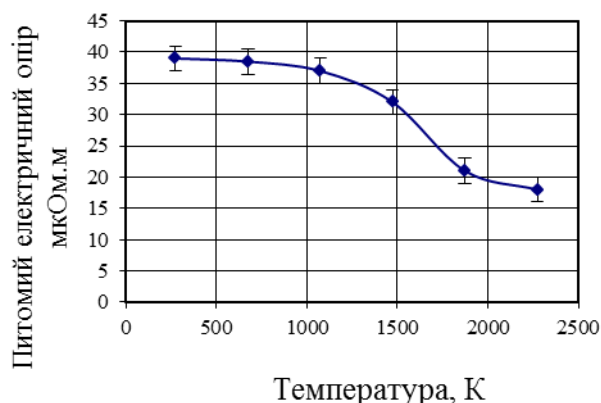


Рис. 13 Зміна питомого електричного опору ВВКМ від температури

Значне зниження ПЕО при температурах вище 1000 К припускає управління температурним режимом методом регулювання за величиною електричного струму.

Формування теплових вузлів у вигляді тришарових конструкцій, зовнішній і внутрішній шар яких виконаний з ВВКМ на основі графітової вуглецевої тканини, а внутрішній шар з низькощільного ВВКМ, отриманого методом висадки з водних суспензій на основі рубаних карбонізованих віскозних волокон і порошку фенолоформальдегідної смоли. Такі теплові вузли забезпечують зниження споживання електричної енергії на 8...10 %, збільшення ресурсу роботи вузлів до 15 %.

Важливою функціональною характеристикою ВВКМ є стійкість в умовах дії високоенергетичних газових потоках. Встановлено масове віднесення у високошвидкісному потоці киснево-пропановму полум'ї при температурі 1900...2190 К. Віднесення для карбонізованих ВВКМ складає $0,105 \cdot 10^{-4} \dots 0,287 \cdot 10^{-4}$ г/см²·с, для піроущільнених $0,113 \cdot 10^{-4} \dots 0,205 \cdot 10^{-4}$ г/см²·с та для силіційованих $0,022 \cdot 10^{-4} \dots 0,117 \cdot 10^{-4}$ г/см²·с.

Силіційовані ВВКМ характеризуються високою стійкістю до дії різних агресивних середовищ. Втрата маси силіційованих ВВКМ в киплячих концентрованих кислотах впродовж 60 діб не перевищує 1,5 %, в розплаві чавуну – 0,006 мм/хв, у розплаві шлаку – 0,015 мм/хв. У розплаві кольорових металів стійкість силіційованих ВВКМ значно вища, ніж в розплаві чавуну. У розплаві алюмінію при температурі 1053 К впродовж 100 годин силіційовані ВВКМ не змінювали свого зовнішнього вигляду, втрата маси не перевищувала одного відсотка.

Застосування силіційованих ВВКМ в якості сталерозливних стаканів збільшує їх стійкість з 75 % до 96% в порівнянні з шамотно-каоліновими, глинисто-графітовими і високоглиноземистими стаканами.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана актуальна науково-технічна проблема по розробці основ формування експлуатаційних властивостей композиційних матеріалів на основі вуглецю. Отримані теоретичні і практичні результати дозволили зробити наступні висновки:

1. Розроблено технологію підготовки зв'язуючого, яка оперативно реалізує механізм забезпечення в'язкості в межах технологічного допуску 70...100 сек по ВЗ-246. Розроблено і експериментально перевірено оперативні механізми контролю ступеню отвердження по зміні маси зв'язуючого, що отверджується, за величиною теплового ефекту процесу отвердження і по зміні динамічного модуля пружності. Розроблено методику адаптаційного методу управління температурно-часовим режимом процесу отвердження заготовок з вуглепластиків в автоклавах аеродинамічного нагріву. Запропонована методика забезпечує технологічну точність температурно-часового режиму в об'ємі заготовки, повністю усуває можливість появи дефектів у вигляді розшарувань,

тріщиноутворень в об'ємі зв'язуючого, появи зон пористості і нерівномірного розподілу матриці.

2. Розроблена технологічна схема та відпрацьовані технологічні режими отримання вуглець-фторопластових композиційних матеріалів на основі фторопласту Ф4, вуглецевих волокон ВМН-4 (УФМ-1) і вуглецевої тканини ТГН-2М (УФМ-2). Досліджено триботехнічні і механічні характеристики, а також хемостійкість матеріалів УФМ-1 та УФМ-2. Встановлено, що значення коефіцієнтів тертя знаходяться в діапазоні 0,05...0,09, лінійного зносу – у діапазоні 4,10...5,10 мкм/км, втрата маси протягом 1000...1200 годин в сірчаній кислоті не перевищує 3%, азотній – 1,2%, соляній – 1,3%.

3. Визначено модулі пружності, межі міцності, коефіцієнти Пуассона і коефіцієнти термічного лінійного розширення для отвердженої фенолоформальдегідної смоли та вуглепластиків з різними схемами армування в процесі карбонізації при температурах 573 К, 873 К та 1073 К. У рамках неоднорідного середовища класу В2 розроблено метод розрахунку процесу карбонізації з урахуванням термохімічних перетворень кожного компонента вуглецевого композиту. Встановлено основні параметри технології карбонізації полімерних вуглепластиків, визначено структурні параметри ВВКМ, карбонізованих в різних середовищах і температурно-часових параметрів.

4. Розроблено методику розрахунку процесу профілізації пористої структури карбонізованих ВКМ в середовищі діоксиду вуглецю, встановлено кінетичні параметри процесу газифікації основних компонентів ВКМ - енергію активації і передекспоненту. В процесі профілізації структура пор набуває форми, що розширюється від центру стінки до поверхні. Така структура пор забезпечує найбільш сприятливі умови заповнення пористої структури як з газової, так і рідкою фаз.

5. Встановлена структура термохімічних перетворень реакційних газів в об'ємі реактора при ущільненні пористої структури ВВКМ піровуглецем з газової фази. Розроблена система дозволяючих рівнянь процесу ущільнення пористої структури в проточних круговому і плоскому термохімічних реакторах. Система враховує розкладання природного газу в об'ємі реактора, дифузію реакторних газів до пористої поверхні, дифузію реакційних газів в пори з утворенням на гарячих поверхнях піровуглецю.

6. Розроблено методику визначення об'ємного вмісту піролітичного вуглецю, що осаджується в пористій структурі карбонізованого ВКМ, заснована на лінійному впливі вмісту піровуглецю на інтенсивність дифракційної лінії рентгенівського випромінювання від площини віддзеркалення (002) в трикомпонентному порошку на основі піровуглецю, вуглецевих волокон і карбонізованого фенолоформальдегідного зв'язуючого. Розрахунково - експериментальним шляхом встановлено технологічні параметри процесів ущільнення, встановлено розподіл піровуглецю по товщині ущільнюваних заготовок з карбонізованих ВКМ.

7. Встановлено закономірності процесу силіціювання карбонізованих ВВКМ та побудовано диференційне рівняння другого порядку нелінійного виду, що описує процес силіціювання карбонізованого ВКМ в умовах інфільтраційного просочення з вакуумуванням об'єму композиту. У рівнянні враховуються капілярні сили, сили в'язкого опору течії розплаву по порах, гравітаційні сили і залишковий тиск вакуумування. Отримано рішення побудованого рівняння, яке дозволяє оцінювати глибину просочення залежно від часу протікання процесу.

8. Встановлено вплив компресійного тиску на міру заповнення пористого об'єму карбонізованих ВКМ нанорозмірною фторопластовою суспензією. При величині компресійного тиску 700 МПа міра заповнення об'єму пор фторопластовою суспензією досягає 98 %. При цьому коефіцієнти тертя просочених ВКМ знижуються з 0,17 до 0,025.

9. Розрахунково - експериментальним шляхом визначена залишкова термоструктурна напружка в пластинчатому пірографіті. Встановлено, що рівень залишкової напружки досить близький до межі міцності пірографіту на зрушення в площині базових площин. Цей факт підтверджує експериментально встановлене розшаровування пластинчатого пірографіту в площині (002).

10. Визначена залежність межі міцності пірографіту на вигин від висоти кристалітів L_c , яка підкоряється параболічному закону з максимальним значенням в інтервалі $L_c = 90...95 \cdot 10^{-10}$ м. Параболічна залежність визначається впливом межкристалітних меж. При збільшенні поверхні межкристалітних меж до критичних розмірів кристалітів $L_c = 90...95 \cdot 10^{-10}$ м міцність зростає, і при подальшому збільшенні - знижується.

11. Проведена оцінка ерозійної стійкості у високоенергетичних потоках газу в діапазоні температур від 1900 К до 2190 К для карбонізованих ВВКМ, піроущільнених ВВКМ і силіційованих ВВКМ. Встановлено, що в умовах окислювального потенціалу ерозійна стійкість знаходиться в межах $(0,07...0,117) \cdot 10^{-4}$ г/(см²·с) для силіційованих ВВКМ, $0,276 \cdot 10^{-4}$ г/(см²·с) – для карбонізованих ВВКМ і для піроущільнених ВВКМ – $(0,177...0,205) \cdot 10^{-4}$ г/(см²·с). В умовах відновного потенціалу ерозійна стійкість знаходиться в межах $(0,022...0,067) \cdot 10^{-4}$ г/(см²·с) для силіційованих ВВКМ, $(0,078...0,105) \cdot 10^{-4}$ г/(см²·с) – для карбонізованих ВВКМ і для піроущільнених ВВКМ – $(0,160...0,213) \cdot 10^{-4}$ г/(см²·с).

12. Розв'язана проблема вдосконалення технології, яка забезпечує отримання ВВКМ з підвищеними функціональними характеристиками і зниженою собівартістю. Розроблені ВВКМ застосовують в якості теплових вузлів для агрегатів типу ULVAC – FHV – 90 – GS (Японія), УПФ – 842 (Росія), газостатів 4,2 МН та 20 МН (Росія), реактора УНЭС – 101 (Україна) забезпечує збільшення ресурсу від 8 до 12 місяців, призводить до економії електричної енергії на 10 – 15%.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Скачков В.А. Газофазные процессы в технологии высокотемпературных композиционных материалов [монография] / В.А.Скачков, О.Р.Бережная // Запорожье: ЗГИА, 2016. – 145с.
2. Скачков В.А. Високотемпературні композиційні матеріали на основі вуглецю та кераміки [монография] / В.А.Скачков, О.Р.Бережная Ю.О.Белоконь // Запорожье: ЗГИА, 2016. – 301с.
3. Скачков В.А. Формирование структуры и функциональных свойств композиционных материалов на основе углерода [монография] / В.А. Скачков // Запорожье: ЗГИА, 2013. – 300с.

Статті в наукових фахових виданнях:

4. Скачков В.О. Методи газофазного ущільнення карбонізованих вуглепластиків піровуглецем / В.О.Скачков, С.А.Воденніков, В.І.Іванов,Т.М.Нестеренко,О.Р.Бережная // Scientific Journal „ScienceRise“.- 2016.-volume 10/2 (27)/- Р. 16-21. (Журнал індексується в світових наукометричних базах даних і системах **IndexCopernicus; РИНЦ; CrossRef; WorldCat; DOAJ; BASE; ResearchBib; DRJI; CiteFactor; OAJI; Ulrich's Periodicals Directory; Scientific Indexing Services; Sherpa/Romeo; Advanced Science Index; General Impact Factor (GIF)**).
5. Skachkov V.A. Physicochemical Foundations of Compactification of the Porous Structure of Pyrocarbon from the Gas Phase / V.A. Skachkov, O.R Berezhnaya // Materials Science. 2015, Volume 50, Issue 4, Page 585 – 592. (Журнал індексується в світових наукометричних базах даних і системах **Scopus**).
6. Скачков В.А.Физико-химические основы уплотнения пористой структур пироуглеродом из азовой фазы / В.А. Скачков, О.Р. Бережная// Физико-химическая механика материалов. 2014, № 4. С.94-99. (Журнал індексується в світових наукометричних базах даних і системах **Scopus**).
7. Скачков В.О. Моделювання газофазового ущільнення вуглецевих композитів за умов термоградиента / В.О.Скачков, В. І .Іванов, Т.М. Нестеренко, Ю.В. Мосейко// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Прикладная физика. 2013, 4/5 (64). С. 12-14. (Журнал індексується в світових наукометричних базах даних і системах **CrossRef, IndexCopernicus, American Chemical Society, РИНЦ, WorldCat, Ulrich's Periodicals Directory, BASE, ResearchBib, CiteFactor**).
8. Карпенко А.В. Получение низкоплотных углеродных композиционных материалов / А.В. Карпенко, В.А. Скачков, И.Ф. Червоний // Восточно – Европейский журнал передовых технологий. Прикладная физика и материаловедение, 2013, 1/5 (61), С. 48 – 51. (Журнал індексується в світових наукометричних базах даних і системах **CrossRef, IndexCopernicus, American Chemical Society, РИНЦ, WorldCat, Ulrich's Periodicals Directory, BASE, ResearchBib, CiteFactor**).
9. Скачков В.О. Про моделювання газофазного ущільнення вуглець-вуглецевих композитів / В.О. Скачков, В.І. Іванов, С.А. Воденніков, Ю.В. Мосейко // Восточно – Европейский журнал передовых технологий. Прикладная физика и материаловедение, 2013, 2/5 (62), С. 16 – 19. (Журнал індексується в світових наукометричних базах даних і системах **CrossRef, IndexCopernicus,**

American Chemical Society, ПИНЦ, WorldCat, Ulrich's Periodicals Directory, BASE, ResearchBib, CiteFactor).

10. Skachkov V. Mathematical model for compression of carbon composites from gas phase / V. Skachkov, V. Ivanov, T. Nesterenko, Yu. Mosejko // Modern scientific research and their practical application / Odessa: National Maritime University, 2012, February. P. 27 – 37. (Журнал індексується в світових наукометричних базах даних і системах **IndexCopernicus**).

11. Скачков В.А. Массоперенос при изотермическом уплотнении карбонизованных углепластиков / В.А. Скачков, В.И. Иванов, С.А. Воденников, Ю.В. Мосейко // Восточно – Европейский журнал передовых технологий. Прикладная физика и материаловедение, 2012, 1/5 (55), С. 8 – 11. (Журнал індексується в світових наукометричних базах даних і системах **CrossRef, IndexCopernicus, American Chemical Society, ПИНЦ, WorldCat, Ulrich's Periodicals Directory, BASE, ResearchBib, CiteFactor**).

12. Скачков В.О. Математичне формулювання процесу зносу багатокомпонентних композитів у зоні тертя / В.О. Скачков, В.І. Иванов, С.А. Воденніков, С.С. Сергієнко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2011. 2/7(50), С. 44 – 47. (Журнал індексується в світових наукометричних базах даних і системах **CrossRef, IndexCopernicus, American Chemical Society, ПИНЦ, WorldCat, Ulrich's Periodicals Directory, BASE, ResearchBib, CiteFactor**).

13. Skachkov V. Model formulation of high – temperature processing for structurally non – inform medium on the basis carbon / V. Skachkov, V. Ivanov, S. Egorov, T. Nesterenko, Yu. Mosejko // The Advanced science open access journal // volume, 2011. – P.16 – 19. (Журнал індексується в світових наукометричних базах даних і системах **IndexCopernicus**)

14. Скачков В.А. Математическая модель износа многофазных композитов в зоне трения / В.А. Скачков, В.И. Иванов, С.С. Сергиенко, Т.Б. Янко // Порошковая металлургия. 2012. – 7/8. – С.58 – 64. (Журнал індексується в світових наукометричних базах даних і системах **Scopus**).

15. Скачков В.А. Модель изотермического газофазного уплотнения углеродных композитов / В.А. Скачков, В.И. Иванов, Т.Н. Нестеренко, Ю.В. Мосейко // Оралдын Ғылым жаршысы / Научно – теоретический и практический журнал. 2012. – №5 (41). – С.77 – 82.

16. Скачков В.А. Математические модели процессов температурной обработки и уплотнения в производстве углеродных композиционных материалов / В.А. Скачков, В.Д.Карпенко, В.И. Иванов, Е.В.Скачков // Вопросы атомной науки и техники / Харьков, 1999. – Вып. 4 (76) – С. 3 – 12. (Журнал індексується в світових наукометричних базах даних і системах **Scopus**)

17. Скачков В.А. Влияние технологических факторов на формирование структурно-механических параметров пиролитического графита / В.А. Скачков // Металургія: Зб. наук. праць ЗДІА - Запоріжжя: ЗДІА, 2013. № 1(29). – С.83-88. (Журнал включено до переліку наукових фахових видань **України**).

18. Скачков В.А. Моделирование процесса уплотнения углерод – углеродных композитов пироуглеродом в плоском реакторе / В.А. Скачков, В.И. Иванов, В.П. Грицай, С.В. Болюк // В мире научных открытий: Журнал – Красноярск, 2010. - №4 (10), часть 10. – С.147 – 151.

19. Скачков В.А. Формирование триботехнических характеристик пирографита различной структуры / В.А. Скачков // Металургія: Зб. наук. праць

ЗДІА - Запоріжжя: ЗДІА, 2012. № 2(27). – С.120-123. (Журнал включено до переліку наукових фахових видань **України**)

20. Скачков В.А. Анализ методов газофазного уплотнения пористых углерод – углеродных композиционных материалов / В.А. Скачков // *Металургія: Зб. наук. праць ЗДІА - Запоріжжя: ЗДІА, 2003. № 7. – С.70-77.* (Журнал включено до переліку наукових фахових видань **України**)

21. Скачков В.А. Деформационная анизотропия и разрушение при сложном нагружении композиционных материалов триботехнического типа / В.А. Скачков // *Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов - Краматорск: ДГМА, 2013. № 1(34). – С.165-169.* (Журнал включено до переліку наукових фахових видань **України**)

22. Скачков В.А. Триботехнические углерод – алюминиевые композиты адаптационного типа / В.А. Скачков, В.И. Иванов, С.А. Воденников, С.С. Сергиенко // *Материаловедение. М.: «Наука и Технологии». – 2013. - №2. – С.40 – 44.*

23. Скачков В.А. Разработка математической модели уплотнения композитов на основе углерода в нестационарных условиях зоны пиролиза / В.А. Скачков, В.И. Иванов, С.А. Воденников, Ю.В. Мосейко // *Теория и практика металлургии. - 2012. - № 4 (87). - С.66-68.* (Журнал включено до переліку наукових фахових видань **України**)

24. Скачков В.А. Методические основы пропитки пористых углерод – углеродных композиционных материалов жидким кремнием / В.А. Скачков, С.А. Воденников, О.Р. Бережная, В.И. Иванов // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения // Международный сборник научных трудов. – Донецк, 2011. – С.293 – 296.* (Журнал включено до переліку наукових фахових видань **України**)

25. Скачков В.О. Про формування структурно – механічних змінювань під час газифікації / В.О. Скачков, С.А. Воденніков, В.І. Иванов, Т.М. Нестеренко // *Математичне модулювання// Науковий журнал 2011. №2 (25) С. 64 – 66.* (Журнал включено до переліку наукових фахових видань **ВАК України**)

26. Скачков В.А. Моделирование процесса образования поликристаллического кремния в проточном реакторе / В.А. Скачков, Т.В. Критская, О.Р. Бережная, Л.Я. Шварцман, Р. Меркер // *Наукові нотатки: Міжвузівський зб. наук. праць ЛНТУ - Луцьк: ЛНТУ, 2013. вип. 40. – С.257-260.* (Журнал включено до переліку наукових фахових видань **України**)

27. Скачков В.О. Моделювання процесу просочення пористих вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів рідким силіцієм / В.О. Скачков, О.Р. Бережна, В.І. Иванов, Т.М. Нестеренко, Н.В. Лічконенко // *Металургія: Зб. наук. праць ЗДІА - Запоріжжя: ЗДІА, 2011. № 24. – С.108-112.* (Журнал включено до переліку наукових фахових видань **України**)

28. Скачков В.О. Деякі аспекти математичного моделювання процесу нагрівання вуглепластикових заготовок під час автоклавного затвердіння / В.О. Скачков, В.І. Иванов, В.І. Доненко, Ю.В. Мосейко // *: Вісник національного технічного університету ХПІ / - Харків, ХПІ, 2011. – Вип.54. С. 141 – 144.* (Журнал включено до переліку наукових фахових видань **України**)

29. Скачков В.А. Разработка методики расчета процесса уплотнения пористой структуры углерод – углеродных композиционных материалов в плоском реакторе / В.А. Скачков, В.И. Иванов, А.В. Скачков // *Металургія: Зб.*

наук. праць ЗДІА - Запоріжжя: ЗДІА, 2010. № 21. – С.145-149. (Журнал включено до переліку наукових фахових видань **України**)

30. Скачков В.А. Моделирование структурно-механических изменений при карбонизации композиционных материалов на основе углерода / В.А. Скачков, В.П. Грицай, В.И. Иванов, А.В. Карпенко // Вопросы химии и химической технологии. Днепропетровск: УДХТУ. 2007, № 6. С. 165-167. (Журнал індексується в світових науко метричних базах даних і системах **Ulrich's Periodicals Directory** and indexed by **Scopus, Chemical Abstracts Service (CAS), Google Scholar, J-Gate, Referativnyi Zhurnal, and Open Academic Journals Index**)

31. Скачков В.А. Кинетические особенности нанесения электролитических покрытий на углеродные волокна / В.А. Скачков, С.С. Сергеенко, В.И. Иванов // Теория и практика металлургии. - 2009. - № 1-2. - С.35-38. (Журнал включено до переліку наукових фахових видань **України**)

32. Скачков В.А. Разработка математической модели разложения углеводородов в изотермических реакторах проточного типа / В.А. Скачков, В.И. Иванов, А.В. Карпенко, С.В. Боллюк, Ю.В. Мосейко // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании (Сб. научн. трудов): – Одесса, 2007. – Т.3. – С. 62 – 64. (Журнал включено до переліку наукових фахових видань **України**)

33. Скачков В.А. Структура и свойства термостойких углерод-кремниевых композитов / В.А. Скачков, В.И. Иванов, О.Р. Бережная, А.В. Карпенко // Вестник двигателестроения. Запорожье: ЗНТУ. 2004, №3. С.133-135. (Журнал включено до переліку наукових фахових видань **України**)

34. Скачков В.А. Свойства и применение углеродных композиционных материалов / В.А. Скачков, А.В. Карпенко, В.И. Иванов, В.П. Грицай, Н.А. Карпенко, В.Ф. Сапов // Металургія: Зб. наук. праць ЗДІА - Запоріжжя: ЗДІА, 2005. № 12. – С.71-80. (Журнал включено до переліку наукових фахових видань **України**)

35. Скачков В.О. Моделювання й аналіз методів газофазного ущільнення поруватих вуглець – вуглецевих композитів / В.О. Скачков, В.І. Иванов, В.Д. Карпенко // Математичне моделювання: Науковий журнал - , 2004. №2 (12). – С.47 – 51. (Журнал включено до переліку наукових фахових видань **України**)

36. Скачков В.О. Про ущільнення вуглецевих композиційних матеріалів піролітичним вуглецем за умов термоградієнту / В.О. Скачков, В.П. Грицай, В.І. Иванов, Т.М. Нестеренко, В.М. Печеннікова // Металургія: Зб. наук. праць ЗДІА - Запоріжжя: ЗДІА, 2004. № 10. – С.99-102. (Журнал включено до переліку наукових фахових видань **України**)

37. Скачков В.А. Низкотемпературное осаждение пиролитического углерода в пористых композиционных материалах / В.А. Скачков, Р.А. Шаповалов, В.И. Иванов // Металургія: Зб. наук. праць ЗДІА - Запоріжжя: ЗДІА, 2004. № 9. – С.63-66. (Журнал включено до переліку наукових фахових видань **України**)

38 Скачков В.А. Эксплуатационные свойства углерод – фторопластовых материалов / В.А. Скачков, В.И. Иванов, А.В.Карпенко, В.М. Печенникова, Р.А. Шаповалов, Я.Н. Сидоренко // Металургія: Зб. наук. праць ЗДІА - Запоріжжя: ЗДІА, 2001. № 5. – С.82-84. (Журнал включено до переліку наукових фахових видань **України**)

39. Скачков В.А. Метод прогнозирования коэффициентов трения многокомпонентных композиционных материалов / В.А. Скачков, А.В.Карпенко, В.М. Печенникова, Р.А. Шаповалов, Е.В.Скачков // *Металургія: Зб. наук. праць ЗДІА - Запоріжжя: ЗДІА, 2001. № 4. – С.78-81.* (Журнал включено до переліку наукових фахових видань **України**)

Патент України:

40. Пат. 116333 Україна, МПК (2006.01), C04B 35/52, C04B 35/532, C04B 35/577, C04B 35/83. Спосіб виготовлення силіційованого композиційного матеріалу / В.О. Скачков, О.Р. Бережна; заявник і патентовласник Запорізька державна інженерна академія. - № u201613334; заявл. 26.12.2016; опубл. 10.05.2017. – 6с.

Матеріали конференцій:

41. Скачков В.О. Оцінка стійкості вуглецевих композиційних матеріалів у високоенергетичних газових потоках / В.О. Скачков, О.Р. Бережная // *Збірник наукових статей VI міжнародної наукової конференції “Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 6”, м.Київ (1–2 грудня 2016 р.). – Київ: НТУУ “КПІ”, 2016. – С. 116-121.* (заочна участь)

42. Скачков В.А. О прогнозировании механических характеристик силицированных композиционных материалов на основе углеродных волокон с защитным покрытием / В.А. Скачков, О.Р. Бережная, В.И. Иванов // *Збірник наукових статей V міжнародної наукової конференції “Матеріали для роботи в екстремальних умовах - 5”, м.Київ (3–5 грудня 2015 р.). – Київ: НТУУ “КПІ”, 2015. – С. 58-62.* (секційна доповідь)

43. Скачков В.О. Моделирование процесса упрочнения пористой структуры вуглецевых композиционных материалов с учетом распределения пор по величине диаметра / Скачков В.О., Иванов В.И., Нестеренко Т.М., Мосейко Ю.В. О.Р. Бережна // *Збірник наукових статей п'ятої міжнар. науково-практ. конф. “Комп'ютерне моделювання в хімії і технологіях та системах сталого розвитку – КМХТ 2016”, м.Київ (18–20 травня 2016 р.). – Київ: НТУУ “КПІ”, 2016. – С.105–109.* (заочна участь)

44. Скачков В.А. Деформационная анизотропия при сложном нагружении композиционных материалов триботехнического типа / В.А. Скачков // *Матеріали II міжнародної науково – практичної конференції «Машини і пластична деформація металів. Запоріжжя: ЗНТУ. 2012. С. 15 – 16.* (секційна доповідь)

45. Skachkov V. The influence of porous structure of carbon materials on liquid-phase impregnation by liquids silicon / V. Skachkov, V. Ivanov, T. Nesterenko, S. Egorov, O. Berezhnaya, Yu. Mosejko // *The Advanced science open access journal // Volume 2011. P. 66 – 69.* (заочна участь)

46. Скачков В.А. О процессе уплотнения углерод – углеродных композитов в плоском реакторе / В.А. Скачков, В.И. Иванов, Т.Н. Нестеренко, Ю.В. Мосейко // *Матеріали II міжнародної науково – практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». – Чернігів, 2012. С. 67 – 68.* (заочна участь)

47. Скачков В.А. Некоторые аспекты износа композиционных материалов адаптационного типа / В.А. Скачков, В.И. Иванов, Ю.В. Мосейко, С.С. Сергеенко // *Материалы VIII международной конференции «Стратегия качества*

в промышленности и образовании». – Варна, 2012. – Том1. – С.137 – 138. (заочна участь)

48. Скачков В.О. Прогнозування коефіцієнтів лінійного теплового розширення багатокомпонентних металовуглецевих композитів / В.О. Скачков, В.І. Иванов, О.С. Воденнікова, Ю.В. Мосейко // Materiály VIII mezinárodní vědecko-praktická konference «Vedeky p'rok na prelomu t'usyachalety - 2012». – Praha, Publishing House «Education and Science» s.r.o., 2012. P 145 – 147. (заочна участь)

49. Скачков В.А. К расчету уплотнения углеродных композитов пироуглеродом из пропана в плоском реакторе / В.А. Скачков, В.И. Иванов, Ю.В. Мосейко, А.В. Карпенко // Материалы XXV международной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (Труды конференции). - Саратов, 2012. – С.140 - 141. (заочна участь)

50. Скачков В.А. Моделирование формирования плотности углеродных композитов из газовой фазы в условиях термоградиента / В.А.Скачков, В.И. Иванов, В.Д. Карпенко, О.С. Воденникова // Материалы XXIV международной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (Труды конференции). - Саратов, 2011. – С.71 - 72. (заочна участь)

51. Скачков В.О. Математичне моделювання змінювання щільності вуглецевих композитів за умов термоградиенту / В.О. Скачков, В.І. Иванов, І.С. Масюк // Матеріали IV міжнародowej naukowe-praktycznej konferencji «Naukowa mysl informacyjnego wieku – 2010» - Prezemyśl: Nauka i studia, 2010. V.10 – С.16-18. (заочна участь)

52. Скачков В.А. Улучшение свойств углерод-кремниевых композитов / В.А.Скачков, О.Р. Бережная, В.И. Иванов, А.В. Карпенко, Ю.В. Моисейко // Materiály V mezinárodní vědecko-praktická konference «Moderní vymoženosti vědy - 2010». – Praha, Publishing House «Education and Science» s.r.o., 2010. – С.10-11. (заочна участь)

53. Скачков В.А. Получение антифрикционных материалов методом термохимического прессования / В.А. Скачков, Т.Б. Янко // «Передовые космические технологии на благо человечества» (Труды конференции). – Днепропетровск. КБЮ, 2009. – С.68. (секційна доповідь)

54. Скачков В.О. Математична модель формування щільності пористих вуглецевих композитів під час газифікації / В.О. Скачков, В.І. Иванов, В.В. Стойчев // Композиционные материалы в промышленности Материалы XXVIII международной конференции: - Ялта, 2008. – С.170 - 172. (секційна доповідь)

55. Скачков В.А. Структура, свойства и применение углеродных материалов и композитов на основе углеродных и карбидкремниевых матриц / В.А. Скачков, В.Е. Бевз, Т.В. Критская, О.Р. Бережная // Сборник тезисов II Всероссийская конференция по наноматериалам «НАНО - 2007», Новосибирск. – 2007. – С.108. (секційна доповідь)

56. Скачков В.А. Многокомпонентные композиты триботехнического назначения: технология, структура, свойства / В.А. Скачков, О.Р. Бережная, В.И. Иванов // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов Материалы 6 – й Международный конгресс «ОТТОМ - 8». – Харьков: ННЦ «ХФТИ», 2007. – С. 120 – 123. (заочна участь)

57. Скачков В.А. Микроструктурный подход к прогнозированию триботехнических характеристик многокомпонентных композитов / В.А. Скачков, В.И. Иванов // «Актуальные проблемы трибологии» Сборник трудов

международной научно – технической конференции – М.: Машиностроение, 2007. Т.3. – С. 559 – 562. (секційна доповідь)

58. Скачков В.А. К расчету физико-механических характеристик карбонизованных углеродных композитов / В.А. Скачков, В.И. Иванов, А.В. Карпенко, О.Р. Бережная // Материалы XXVII международной конференции «Композиционные материалы в промышленности» (Труды конференции). - Ялта, 2007. – С.107 - 109. (секційна доповідь)

59. Скачков В.А. Влияние защитного покрытия на характеристики силицированных углеродных композитов / В.А. Скачков, О.Р. Бережная, В.И. Иванов, А.В. Карпенко // Материалы 6-ой Международной научно-практической конференции «Вакуумные нанотехнологии и оборудование». - Харьков: ННЦ ХФТИ, 2006. Т.2. – С. 308-310. (заочна участь)

60. Скачков В.А. Формирование защитных покрытий на углерод – кремниевых композитах / В.А. Скачков, О.Р. Бережная, В.И. Иванов // «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследование, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий» (Труды конференции). - Жуковка, 2006. – С.231. (секційна доповідь)

61. Скачков В.А. Структура, свойства и технология многокомпонентных композитов триботехнического назначения / В.А. Скачков // Материалы XXVI международной конференции «Композиционные материалы в промышленности» (Труды конференции). - Ялта, 2006. – С. 236. (заочна участь)

62. Скачков В.А. Пиролитический графит, его структура, свойства и параметры получения / В.А. Скачков, В.Д. Карпенко, В.И. Иванов // «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий» (Труды конференции). – Кацевелли, 2004. – С.343. (секційна доповідь)

63. Скачков В.А. Методы уплотнения пористых углерод – углеродных композитов из газовой фазы / В.А. Скачков, В.Д. Карпенко, В.И. Иванов, В.М. Печеникова // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов / 4 – й Международный конгресс «ОТТОМ - 4» (Труды конференции). – Харьков: ННЦ «ХФТИ», 2003. – С. 55 – 57. (секційна доповідь)

64. Скачков В.А. Углеродные композиционные материалы триботехнического назначения: технология, структура, свойства / В.А. Скачков, В.Д. Карпенко // Материалы XXIII международной конференции «Композиционные материалы в промышленности» (Труды конференции). - Ялта, 2003. – С.104. (секційна доповідь)

65. Skachkov V. Problems of theory and practice of creation of carbon – carbon composite materials / V. Skachkov, V. Karpenko // Second international conference «Materials and coatings for extreme performances», Katsiveli, 2002. – P.84 – 85. (секційна доповідь).

АНОТАЦІЯ

Скачков В.О. Науково-технічні основи формування функціональних властивостей композиційних матеріалів на основі вуглецю. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.06 – порошкова металургія і композиційні матеріали.

- Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, 2018.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню науково-прикладної проблеми розробки науково-технічних основ формування структури і властивостей композиційних матеріалів, математичному моделюванню технологічних і фізико-хімічних процесів, що є основою технології вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів.

Розроблена модель процесу карбонізації вуглепластикових заготівель, яка оцінює пружні, міцнісні і теплофізичні характеристики залежно від температури.

Запропоновано спосіб профілізації пористої структури карбонізованих ВКМ в середовищі діоксиду вуглецю.

Розроблена математична модель і визначено технологічні параметри газофазного ущільнення пористої структури ВВКМ в проточному термохімічному реакторі в ізотермічних умовах як в середовищі природного газу, так і парах зріджених вуглеводнів.

Проведено дослідження рентгено-структурних параметрів пірографіту, встановлено їх вплив на характеристики міцності і рівень залишкової термічної напруги.

Вдосконалена структура фрикційних композиційних матеріалів і встановлено її вплив на підвищення коефіцієнтів тертя в умовах сухого і вологого середовища.

Матеріали дисертаційної роботи пройшли дослідно-промислову апробацію в умовах ВАТ «ДЗ Вуглекомполит», ВАТ «Укрграфіт», УкрНДІТМ.

Річний економічний ефект від впровадження розроблених результатів склав 0,533 млн. грн. на рік.

Ключові слова: вуглець-вуглецеві композиційні матеріали, карбонізація, піролітичне ущільнення ВВКМ, мікромеханіка композитів, триботехнічні характеристики, рентгено-структурні параметри.

АННОТАЦИЯ

Скачков В.А. Научно-технические основы формирования функциональных свойств композиционных материалов на основе углерода. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.06 – порошковая металлургия и композиционные материалы. - Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Киев, 2018.

Диссертационная работа посвящена решению научно-прикладной проблеме разработки научно-технических основ формирования структуры и свойств композиционных материалов, математическому моделированию технологических и физико-химических процессов, являющихся основой технологии углерод-углеродных композиционных материалов,

исследованию процессов формирования структурных характеристик и эксплуатационных свойств углепластиков, карбонизованных углепластиков, уплотненных углеродных композиционных материалов пироуглеродом из газовой фазы, пропиткой расплавом кремния и компрессионной пропиткой водной суспензией на основе фторопласта Ф4.

Разработана методика и построен алгоритм оценки упругих, прочностных и теплофизических характеристик углепластиковых заготовок в процессе карбонизации. Методика основана на решении статистической краевой задачи микромеханики структурно-неоднородных тел с учетом термохимических преобразований компонентов композиционного материала.

С целью модификации пористой структуры карбонизованных УУКМ, значительно повышающей эффективность изотермического процесса газофазного уплотнения и жидкофазной пропитки, предложен способ профилирования пор в проточном термохимическом реакторе в среде диоксида углерода при температуре 1030...1130К

Разработана математическая модель и определены технологические параметры газофазного уплотнения пористой структуры УУКМ в проточном термохимическом реакторе в изотермических условиях как в среде природного газа, так и парах сжиженных углеводородов.

Проведено исследование рентгено-структурных параметров пирографита, установлено их влияние на прочностные характеристики и уровень остаточных термических напряжений.

Усовершенствована структура фрикционных композиционных материалов и установлено ее влияние на повышение коэффициентов трения в условиях сухой и влажной среды.

Материалы диссертационной работы прошли опытно-промышленную апробацию в условиях ОАО «ГЗ Углекомпозит», ОАО «Укрграфит», УкрНИИТМ.

Годовой экономический эффект от внедрения разработанных результатов составил 0,533 млн. грн. в год.

Ключевые слова: углерод-углеродные композиционные материалы, карбонизация, пиролитическое уплотнение УУКМ, микромеханика композитов, прочность, триботехнические характеристики, рентгено-структурные параметры.

SUMMARY

Skachkov V.O. Scientifico - technical foundations of the formation of functional properties of composite materials based on carbon. - Manuscript.

The Doctor of Science thesis by specialty 05.16.06 - Powder metallurgy and composite materials. - Frantsevich Institute for Problems of Materials Sciences, NAS of Ukraine, Kyiv, 2018

The dissertation solved scientific and applied problem of development of scientific and technical foundations of the structure and properties of composite materials, technology and mathematical modeling of physical and chemical processes that are the foundation technology of carbon-carbon composites.

A model of the process of carbonization of the carbon preparations, which assesses elastic, strength and thermal properties depending on temperature, is developed.

A method of forming a porous structure carbonated CM among carbon dioxide is proposed.

The mathematical model and determined process parameters vapor seal porous structure CCCM flow in thermochemical reactor under isothermal conditions in the environment as natural gas and liquefied hydrocarbon vapors is developed.

The research of X-ray structural parameters pyrolytic carbon is developed, established their influence on strength characteristics and the level of residual thermal stresses.

Structure of friction composite materials is improved and found its impact on improving friction coefficients in dry and wet environments.

Proceedings of the thesis were research and industrial tested in VAT "DZ Vuglecompozit", VAT "Ukrgrafit", UkrNDITM.

The annual economic effect from the implementation of the developed results was 0.533 million grn. per year.

Keywords: carbon-carbon composite materials, carbonization, pyrolytic seal of CCCM, micromechanics of composites, tribotechnical characteristics, X-ray structural parameters.