

І. В. Гурін¹, к.техн.н., І. Ш. Невлюдов², д.техн.н., професор,
В. Є. Овчаренко², д.техн.н., професор, О. В. Токарева², к.техн.н., професор

ДОСЛІДЖЕННЯ ЩІЛЬНОСТІ ВВКМ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ЕЛЕКТРИЧНИЙ ОБ'ЄМНИЙ ПИТОМИЙ ОПІР

¹ Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Харків

² Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

Ключові слова: технологічний процес, вуглець-вуглецевий композиційний матеріал, заготовка, щільність, пористість, електричний об'ємний питомий опір.

Розробка та вдосконалення енергетичних установок вимагає нових підходів до створення матеріалів для критичних компонентів обладнання. Такі матеріали повинні працювати не тільки в умовах високих температур, мати високу механічну міцність, радіаційну та корозійну стійкість, що дозволяють зберегти працездатність систем протягом часу у повітряному середовищі, необхідного для ліквідації аварії. Одними із матеріалів, які традиційно використовуються в різних галузях промисловості є вуглець-вуглецеві композити [1]. Потенціал цих матеріалів і на сьогоднішній день ще не вичерпаний, їх розглядають як одні із найпріоритетніших матеріалів для використання як в авіаційній, космічній техніці, автомобільній промисловості, так і при створенні різноманітних електричних нагрівачів. Це пов'язано з їх унікальними фізико-механічними властивостями, які забезпечують їм перевагу порівняно з традиційними матеріалами - металами і металевими сплавами [2–4].

Вуглець-вуглецеві композиційні матеріали (ВВКМ) є різномірною структурою, що складається з волокон, матриці та пор. Зміни у структурі вуглецевого матеріалу відбуваються під впливом високих температур та часу ізотермічного витримування, що відображається у змінах фізичних і хімічних властивостей. Високотемпературна обробка за певних технологічних умов та часу ізотермічного витримування заготовок, наступна карбонізація та ущільнення заготовок є важливими технологічними етапами, які впливають на подальші структурні, фізичні та хімічні властивості вуглецевих композитів.

Дослідження та вирішення проблем можливих причин зміни механічних та електричних характеристик вихідних матеріалів ВВКМ та технології отримання матриці сприяють їх широкому використанню в конструкціях електричних нагрівачів спеціальної техніки.

У роботі досліджено структуру та властивості ВВКМ, в якому вуглецева матриця отримана методом осадження піролітичного вуглецю у пористому об'ємі вуглеволоконістого каркаса (преформи) з використанням термоградієнтних газофазних технологій піроущільнення. Формування преформи відбувається шляхом намотування шарів з вуглецевої тканини на графітову оправку. Технологічні режими термоградієнтних газофазних методів ущільнення піровуглецем при температурах 800–1100 °С суттєво впливають на структуру матеріалу.

При формуванні твердого об'ємного тіла можуть утворюватися пори (порожнини), які можуть бути ізольовані одна від одної і не зв'язані з поверхнею; такі пори називаються недоступними. При цьому, пори, які мають вихід на поверхню

твердого тіла, але не пов'язані між собою, називаються тупиковими. Інший тип - це канальні або транспортні пори, які мають зв'язок між собою і з поверхнею твердого тіла. Через ці пори може відбуватися масоперенесення речовини в пористому тілі (фільтрація, дифузія). Середній радіус переважаючих пор: нижній межа становить 1,7–2,5 мкм (тип - дрібнозернистий графіт); верхня межа відповідає 8,9–11,2 мкм (крупнозернистий графіт). Ущільнення преформи термоградієнтним газофазним методом характеризується анізотропією, обумовленою типом використовуваного вуглеволокнистого каркаса.

Процес осадження піроуглероду в порах ВВКМ відбувається шарами, передусім на поверхні посилення волокон [5]. Механізм осадження шарів піроуглероду на поверхні волокон, на нашу думку, подібний до механізму епітаксialного росту і, по суті, аналогічний формуванню шарів графену. Подібні і схожі методи утворення шарів з графену при розкладанні газової суміші на поверхні різних матеріалів висловлені в роботі [5]. Наявність в композиційному матеріалі шарів графену веде до покращення механічних, теплопровідних і електричних характеристик матеріалу. Найбільшого поширення в матеріалознавстві в якості нанорозмірних наповнювачів композитів різного призначення отримали наноструктури вуглецю. З моменту відкриття вуглецевих нанотрубок (ВНТ) вони стали об'єктом численних експериментальних і теоретичних досліджень. Цікавість пояснюється отриманням достатньо високих механічних, хімічних і електричних характеристик даних наноструктур вуглецю. На сьогоднішній день опубліковано велику кількість робіт, присвячених дослідженню залежностей електричних властивостей вуглецевих нанотрубок від їх структури і розмірів [6,7].

ВНТ, залежно від їх структури та будови, можуть проявляти властивості як металу, так і напівпровідника, що підтверджується зменшенням електричного опору ВВКМ при підвищенні температури, тобто температурна залежність має від'ємний температурний коефіцієнт.

Мінімум у температурній залежності електричного питомого опору ВВКМ обумовлений взаємодією двох чинників: зниженням електричного опору аморфного вуглецю, який має напівпровідникові властивості, та зростанням електричного опору впорядкованого (кристалічного) вуглецю, що має властивості напівметала. В процесі термообробки кількість аморфного вуглецю зменшується, в результаті чого графіт набуває властивості напівпровідника, і мінімум питомого електричного опору зміщується в бік більш низьких температур. Взаємодія вуглецю та графіту в композитах, в яких протікає подібний процес, обумовлює утворення перколяційних кластерів. Аналогічні процеси досліджуються в фізико-хімічних та інших галузях для опису виникнення зв'язаних структур у випадкових середовищах, що складаються з окремих елементів [8]. В представлений роботі дані процеси не розглядаються.

Протікання електричного струму в пористому матеріалі також є досить складним явищем, оскільки воно залежить від різних факторів, таких як розмір і форма пор, електричні властивості матеріалу і пор, а також наявність носіїв заряду (наприклад, електронів або іонів).

ВВКМ є чисто вуглецевим матеріалом, який має певну пористість, що залежить від типу використаного вуглецевого волокна та технології виготовлення зразків. До експлуатаційних фізичних властивостей ВВКМ, які є предметом цього дослідження, відносяться такі параметри, як щільність, пористість та електричний об'ємний питомий опір, значення яких залежать від ступеня розподілу пор за розмірами, середнім радіусом та виштовхуваністю капілярів.

Метою представленої роботи є дослідження гідростатичними методами уявної щільності ВВКМ та визначення впливу її значень на електричний об'ємний питомий опір матеріалу.

Для визначення щільності та пористості використані модельні тиглі з ВВКМ. Були проведені зважування сухого зразка – маса P_1 , вага мокрого зразка (після кип'ятіння у воді до постійної ваги) P_2 , та маса зразка у воді P_3 . Потім були розраховані уявна щільність ρ_y , пікнометрична щільність ρ_n та пористість виробу P_0 за формулами [9]:

$$\rho_y = \frac{P_1}{P_2 - P_3}, \quad P_0 = \frac{P_2 - P_1}{P_2 - P_3} \cdot 100\%, \quad \rho_n = \frac{P_1}{P_1 - P_3}.$$

Заготовки з ВВКМ № 1–10 для тиглів мали такі геометричні розміри: зовнішній діаметр заготовки ($D_{\text{зовн}}$) становив близько 58 мм, внутрішній діаметр заготовки ($D_{\text{внутр}}$) був близько 27 мм. Висота заготовок знаходилась у межах 44,9–45,1 мм. Усі розміри вихідного матеріалу наведені в табл.1. Щільність за геометричними розмірами (ρ) знаходилась у межах від 1,244 г/см³ до 1,327 г/см³.

Таблиця 1 – Характеристики заготовок з ВВКМ

№ заготовки	$D_{\text{зовн}}$, мм	$D_{\text{внутр}}$, мм	H_1 , мм	H_2 , мм	V , см ³	m , г	ρ , г/см ³
1	58,0	27,05	45,1	34,7	99,17	130,37	1,314
2	57,9	27,1	45,1	34,6	98,74	125,62	1,272
3	57,95	27,0	45,1	34,6	99,09	123,28	1,244
4	58,0	27,05	45,0	34,5	99,02	127,79	1,290
5	57,95	27,05	44,95	34,5	98,68	125,73	1,274
6	58,0	27,15	44,9	34,6	98,55	130,86	1,327
7	57,95	27,1	45,0	34,6	98,68	126,88	1,285
8	58,0	27,05	45,1	34,5	99,28	126,67	1,275
9	58,0	26,9	45,0	34,5	99,24	126,71	1,276
10	57,95	27,15	45,0	34,5	98,67	122,95	1,246

Примітка: H_1 – висота циліндричної заготовки, H_2 – висота вирізу циліндру діаметром $D_{\text{внутр}}$, V – об'єм, m – маса

Для більш точного визначення щільності, а також для визначення пористості вихідного матеріалу ці заготовки були протестовані гідростатичним методом. В якості рідини для зважування використовували дистильовану воду, щільність якої для підвищення достовірності результатів вимірювали під час проведення дослідження. Суть методу полягає в зважуванні зразка на повітрі, а потім у воді та обчисленні його щільності, тобто визначали P_1 – вага сухого зразка, P_2 – вага мокрого зразка та P_3 – вага зразка у воді. Уявна щільність, визначена таким методом, склала 1,257–1,374 г/см³, що дещо вище, ніж за геометричними розмірами. Пористість заготовок коливається в межах від 8,2 % до 12,5 %.

Для підвищення міцності ВВКМ у наступних експериментах всі заготовки для тиглів ущільнювали в установці піролізу за таким режимом: температуру на поверхні заготовок піднімали від 800 °С до 1100 °С зі швидкістю 10–15 град/год. Тривалість процесу ущільнення становила 24 години. Витрати газу 3–5 м³/год. Після ущільнення

щільність заготовок збільшилась і склала 1,401–1,569 г/см³, пористість зменшилась і становила 3,4–5,4 %.

З ущільнених заготовок були виточені модельні тиглі. Отримані тиглі (коди 14–23, табл. 2) були протестовані гідростатичним методом і повторно розраховані відповідні щільності та пористість. Експериментальні дані представлені в табл. 2. Уявна щільність тиглів з ущільнених заготовок склала 1,362–1,419 г/см³, пористість 4,2–5,8 %.

Таблиця 2 – Щільність та пористість партії тиглів з ущільнених заготовок

Код тигля	P ₁ , г	P ₂ , г	P ₃ , г	ρ _у , г/см ³	Π ₀ , %	ρ _п , г/см ³
14	54,72	56,38	17,30	1,400	4,2	1,46
15	55,12	57,33	16,87	1,362	5,5	1,44
16	55,39	57,46	17,68	1,392	5,2	1,47
17	54,68	56,77	16,67	1,364	5,2	1,44
18	55,91	58,10	18,33	1,406	5,5	1,49
19	54,98	57,12	17,10	1,374	5,3	1,45
20	55,33	57,40	18,40	1,419	5,3	1,50
21	52,42	54,37	15,92	1,363	5,1	1,44
22	54,21	56,48	17,25	1,382	5,8	1,47
23	56,46	58,46	18,42	1,410	5,0	1,48

Далі тиглі з кодами 14–23 були повторно ущільнені в установці піролізу протягом 6 годин за таким режимом: для тиглів з кодами 14–18 встановили температуру на поверхні тиглів 900 °С, витримали протягом 3 годин, потім підняли температуру до 1000 °С, витримали 2 години, знову підняли до 1050 °С і витримали 1 годину. Витрати газу склали 3–4 м³/год. Для ущільнення тиглів № 19–23 встановили температуру на поверхні 900°С, витримали 2 години, потім витримали 1 годину при температурі 950 °С, 1 годину при температурі 1000 °С, 1 годину при температурі 1050 °С і ще 1 годину при температурі 1100 °С. Витрати газу залишилися не змінні. Після ущільнення тиглі також були протестовані гідростатичним методом для визначення щільності та пористості. Отримані значення наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Щільність та пористість партії тиглів з ВВКМ після ущільнення

Код тигля	P ₁ , г	P ₂ , г	P ₃ , г	ρ _у , г/см ³	Π ₀ , %	ρ _п , г/см ³
14	55,87	57,28	17,69	1,411	3,6	1,46
15	56,82	58,52	17,48	1,385	4,1	1,44
16	56,98	58,71	18,25	1,408	4,3	1,47
17	56,31	57,8	17,13	1,385	3,7	1,44
18	57,75	59,48	19,02	1,427	4,3	1,49
19	56,46	58,02	17,6	1,397	3,9	1,45
20	57,89	59,33	19,4	1,450	3,6	1,50
21	54,69	56,08	16,81	1,393	3,5	1,44
22	55,83	59,05	18,03	1,410	3,6	1,45
23	58,01	59,53	18,99	1,431	3,7	1,49

Для тиглів після ущільнення уявна щільність становить 1,385–1,450 г/см³ (порівняно з 1,362–1,419 г/см³ до ущільнення), пористість після ущільнення для тиглів складає 3,5–4,3 %. Розподіл пор і їх розмірів по об'єму прийнято умовно рівномірним. Порівняльна таблиця з щільністю та пористістю тиглів до та після ущільнення наведена в таблиці 4.

Таблиця 4 – Зведені характеристики тиглів до та після ущільнення

Код тигля	ρ_y , г/см ³		P_0 , %	
	до ущільнення	після ущільнення	до ущільнення	після ущільнення
14	1,400	1,411	4,2	3,6
15	1,362	1,385	5,5	4,1
16	1,392	1,408	5,2	4,3
17	1,364	1,385	5,2	3,7
18	1,406	1,427	5,5	4,3
19	1,374	1,397	5,3	3,9
20	1,419	1,450	5,3	3,6
21	1,363	1,393	5,1	3,5
22	1,382	1,410	5,8	3,6
23	1,410	1,431	5,0	3,7

Порівняльний аналіз щільності та пористості тиглів до і після ущільнення дозволяє зробити наступні висновки. Початкові дані свідчать про високий рівень пористості та відносно низьку густоту матеріалу. Однак після процесу ущільнення спостерігається значне зменшення пористості та збільшення густоти, що свідчить про ефективність даної технології. Отримані результати свідчать про те, що процес ущільнення сприяє покращенню структури матеріалу, його фізичних та експлуатаційних характеристик, що є ключовим фактором для підвищення якості та міцності кінцевого виробу.

Розглянуті параметри ВВКМ, такі як щільність, пористість та електричне об'ємний питомий опір, мають важливе значення в процесі виробництва ВВКМ та у подальшому застосуванні в різних галузях. Вимірювання щільності дозволяє контролювати процес формування матеріалу та його структуру, що впливає на його міцність та теплофізичні властивості. Вимірювання пористості важливе для оцінки якості матеріалу, його повітропроникності, а також для оптимізації технологічного процесу його виробництва.

Електричний об'ємний питомий опір є мірою опору матеріалу проходженню електричного струму через його об'єм. Цей параметр важливий для оцінки електричних властивостей ВВКМ, таких як їх провідність, та розраховується за формулою [10]:

$$\rho_v = R_v \frac{S}{t},$$

де R_v – об'ємний активний опір, Ом; S – площа поперечного перерізу тигля, мм²; t – висота тигля, м.

Одним із способів вимірювання опору матеріалу є використання чотириточкового зонду. Ця техніка передбачає приведення чотирьох однаково розташованих зондів у контакт з досліджуємым матеріалом невідомого опору [11]. Для вимірювання об'ємного

активного опору використовувався цифровий вимірювач RLC E7-10: діапазон вимірювань активного опору от 0,001 Ом до 10 МОм, частота вимірювань 1000 Гц, напруга на вимірюваному об'єкті 4,3 В.

Вимірювання опору тиглів проводили в термостаті при температурі 20 ± 1 °С. Тигель розміщувався між двома електродами, форма яких відповідала контуру поперечного перерізу тигля. Вимірювальні електроди виконані планарними, з мідної фольги товщиною 0,1 мм. Електроди стискали з тиглем важельно-гвинтовим пресом, який забезпечує тиск $5,88 \pm 0,03$ МПа [12]. Пропускаючи через тигель постійний електричний струм, за допомогою вимірювальних електродів вимірювалося падіння напруги між торцями виробу, і розрахунковим шляхом визначалося значення об'ємного електричного опору. Результати розрахунку об'ємного електричного питомого опору повторно ущільнених тиглів із ВВКМ наведено в табл. 5.

Таблиця 5 – Характеристики повторно ущільнених тиглів

Код тигля	ρ_y , г/см ³	П ₀ , %	ρ_v , Ом·мм ² /м
14	1,411	3,6	39,612
15	1,385	4,1	40,973
16	1,408	4,3	39,885
17	1,385	3,7	40,971
18	1,427	4,3	39,485
19	1,397	3,9	39,999
20	1,450	3,6	38,94
21	1,393	3,5	40,259
22	1,361	4,1	41,517
23	1,431	3,7	39,156

Розбіжність у розрахунках вимірювань уявної щільності приблизно на $\pm 2,1\%$ можна пояснити очевидною нерівномірністю просочення преформи.

Отримані результати підтверджують, що уявна щільність матеріалу ВВКМ впливає на його електричний об'ємний питомий опір. На рис. 1 приведений графік залежності електричного об'ємного питомого опору від уявної щільності ВВКМ.



Рисунок 1 – Залежність електричного об'ємного питомого опору від уявної щільності

З результатів дослідження видно, що електричний об'ємний питомий опір залежить від багатьох факторів, включаючи і щільність матеріалу. Висока уявна

щільність сприяє зменшенню пористості матеріалу, що, в свою чергу, впливає на електричний об'ємний питомий опір. Таким чином, контроль щільності є важливим аспектом для досягнення певного рівня електричної провідності у вуглець-вуглецевих композитних матеріалів.

Отримані під час дослідження результати свідчать про те, що процес ущільнення ВВКМ сприяє поліпшенню як структури заготовок, так і тиглів, а також підвищенню їх фізичних та експлуатаційних характеристик, що робить їх більш придатними для використання в умовах підвищених температур, агресивних середовищ, у виробництві термостійких компонентів та інших високотехнологічних областях.

Зміна характеристик ВВКМ при повторному ущільненні заготовок свідчить про суттєвий вплив цього процесу на якість матеріалу. Повторне ущільнення збільшує щільність ВВКМ, що призводить до зменшення пористості та покращення механічних властивостей; змінює розподіл пор по об'єму ВВКМ, що впливає на пористість і міцність матеріалу.

Випробування на стенді модельних зразків з ВВКМ підтверджують, що підвищення уявної щільності матеріалу призводить до зменшення його електричного об'ємного питомого опору. Для забезпечення контролю в промисловій практиці ефективним і доступним методом оцінки ступеня завершення кристалічних перетворень і визначення ступеня графітизації при високотемпературній обробці вуглецевих матеріалів можна рекомендувати порівняння електричного об'ємного питомого опору робочого зразка з еталонним.

Таким чином, вимірювання параметрів ВВКМ відіграє ключову роль у забезпеченні їх якості, відповідності технічним вимогам та ефективного використання. Оцінка таких параметрів, як щільність, пористість і електричний об'ємний питомий опір, дозволяє контролювати процес виробництва та якість кінцевого продукту. Ці дані допомагають оптимізувати технологічні процеси та регулювати склад композиційних матеріалів для досягнення бажаних властивостей і характеристик. Точне вимірювання цих параметрів також сприяє підвищенню надійності та довговічності матеріалів під час їх застосування в авіаційній, космічній техніці, автомобільній промисловості та при розрахунку промислових електронагрівачів.

Література

1. Carbon-graphite materials in nuclear-power engineering (review) / V.N. Voyevodin, Yu.O. Gribanov, V.A. Gurin, I.V. Gurin, V.V. Gujda // Problems of atomic science and technology. – 2015, No 2 (96), p. 52–64.
2. Using of carbon-carbon composite materials for creation of thermal-resistive converter of thermal radiation / I.V. Gurin, I.Sh. Nevliudov, V.Ye. Ovcharenko, O.V. Tokarieva // Problems of atomic science and technology. – 2024, № 1 (149) p. 125–127.
3. Застосування ВВКМ для виготовлення високотемпературних нагрівачів теплових вузлів з автоматичним регулюванням температури / Гурін І.В., Невлюдов І.Ш., Овчаренко В.Є., Токарева О.В. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2023, №3, с. 56–66.
4. Струмопідвід для резистивних ВВКМ нагрівачів / Гурін І.В., Невлюдов І.Ш., Овчаренко В.Є., Токарева О.В. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2023, №4, с. 49–57.
5. About the possibility of the TG-CVI processes realizing at the decreased temperatures / I.V. Gurin // Problems of atomic science and technology. – 2015, № 5 (99), p. 140–144.

6. Zhang T, Mubeen S, Myung NV, Deshusses MA. Recent progress in carbon nano-tube-based gas sensors. *Nanotechnology*. 2008 Aug 20; 19(33):332001. DOI: 10.1088/0957-4484/19/33/332001.
7. Recum P, Hirsch T. Graphene-based chemiresistive gas sensors. *Nanoscale Adv*. 2023 Oct 23;6(1):11-31. DOI: 10.1039/d3na00423f.
8. Herega A., Vyrovoy V., Pysarenko A. Percolation Model of Composites: Fraction Clusters and Internal Boundaries. // *International Journal of Composite Materials*. – 2012. – Vol. 2, No 6. – P. 142–146.
9. Study on corrosion properties of carbon-carbon composites / Yu.A. Griбанov, I.V. Gurin, V.V. Gujda, A.N. Bukolov, V.V. Kolosenko // *Problems of atomic science and technology*. – 2020, № 1 (125), p. 154–160.
10. Електроматеріалознавство: навч. посібн. / О. В. Паржницький, С. В. Аушева, Г. Ю. Шулепіна. – Київ: Грамота, 2023. – 224 с.
11. Математичне моделювання контролю питомого електричного опору матеріалів електроконтактним чотиризондовим методом / Є.Р. Доценко // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2010, № 1 (34), с. 82–90.
12. Патент 73401 У Україна, МПК G01R 27/02 (2006.01). Установа для вимірювання питомого електричного опору вуглецевих матеріалів при високих температурах / Т.В. Чирка, Г.М. Васильченко, Ю.В. Дудник; заявник і патентовласник НТУ України «Київ. політехн. ін-т». – № u 2012 02096; заявл. 23.02.2012; опубл. 25.09.2012, Бюл. № 18. – 5 с.

Bibliography (transliterated)

1. Carbon-graphite materials in nuclear-power engineering (review) / V.N. Voyevodin, Yu.O. Griбанov, V.A. Gurin, I.V. Gurin, V.V. Gujda // *Problems of atomic science and technology*. – 2015, No 2 (96), p. 52–64.
2. Using of carbon-carbon composite materials for creation of thermal-resistive converter of thermal radiation / I.V. Gurin, I.Sh. Nevliudov, V.Ye. Ovcharenko, O.V. Tokarieva // *Problems of atomic science and technology*. – 2024, № 1 (149) p. 125-127.
3. Zastosuvannia VVKM dlia vyhotovlennia vysokotemperaturnykh nahrivachiv teplovykh vuzliv z avtomatychnym rehuliuivanniam temperatury / Gurin I.V., Nevliudov I.Sh., Ovcharenko V.Ye., Tokarieva O.V. // *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. – 2023, № 3, p. 56-66.
4. Strumopidvid dlia rezystyvnykh VVKM nahrivachiv / Gurin I.V., Nevliudov I.Sh., Ovcharenko V.Ye., Tokarieva O.V. // *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. – 2023, № 4, p. 49-57.
5. About the possibility of the TG-CVI processes realizing at the decreased temperatures / I.V. Gurin // *Problems of atomic science and technology*. – 2015, № 5 (99), p. 140–144.
6. Zhang T, Mubeen S, Myung NV, Deshusses MA. Recent progress in carbon nano-tube-based gas sensors. *Nanotechnology*. 2008 Aug 20; 19(33):332001. DOI: 10.1088/0957-4484/19/33/332001.
7. Recum P, Hirsch T. Graphene-based chemiresistive gas sensors. *Nanoscale Adv*. 2023 Oct 23;6(1):11-31. DOI: 10.1039/d3na00423f.
8. Herega A., Vyrovoy V., Pysarenko A. Percolation Model of Composites: Fraction Clusters and Internal Boundaries. // *International Journal of Composite Materials*. – 2012. – Vol. 2, No 6. – P. 142–146.

9. Study on corrosion properties of carbon-carbon composites / Yu.A. Gribanov, I.V. Gurin, V.V. Gujda, A.N. Bukolov, V.V. Kolosenko // Problems of atomic science and technology. – 2020, № 1 (125), p. 154–160.

10. Elektromaterialoznavstvo: navch. posibn. / O.V. Parzhnyskyi, S.V. Ausheva, H.Yu. Shulepina. – Kyiv: Hramota, 2023. – 224 p.

11. Matematychnе modeliuвання kontroliu pytomoho elektrychnoho oporu materialiv elektrocontactnym chotyryzondovym metodom / Ye.R. Dotsenko // Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch. – 2010, № 1 (34), p. 82-90.

12. Patent 73401 U Ukraina, MPK G01R 27/02 (2006.01). Ustanovka dlia vymiriuvannya pytomoho elektrychnoho oporu vuhletsevykh materialiv pry vysokykh temperaturakh / T.V. Chyrka, H.M. Vasylychenko, Yu.V. Dudnyk; zaiavnyk i patentovlasnyk NTU Ukrainy «Kyiv. politekhn. in-t». – № u 2012 02096; zaiavl. 23.02.2012; opubl. 25.09.2012, Biul. № 18. – 5 p.

УДК 621.365.4

I. В. Гурін, к.техн.н., I. Ш. Невлюдов, д.техн.н., професор,
В. Є. Овчаренко, д.техн.н., професор, О. В. Токарева, к.техн.н., професор

ДОСЛІДЖЕННЯ ЩІЛЬНОСТІ ВВКМ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ЕЛЕКТРИЧНИЙ ОБ'ЄМНИЙ ПИТОМИЙ ОПІР

В статті досліджено структуру та властивості вуглець-вуглецевих композитних матеріалів (ВВКМ), в яких вуглецева матриця формується методом осадження піролітичного вуглецю у пористому об'ємі вуглеволоконістого каркаса з використанням термоградієнтних газофазних технологій піроуцільнення.

Представлено результати дослідження уявної щільності ВВКМ гідростатичними методами та її вплив на електричний об'ємний питомий опір матеріалу. У проведеному дослідженні встановлено, що електричний об'ємний питомий опір ВВКМ значною мірою залежить від ряду факторів, одним з яких є щільність матеріалу. Збільшення уявної щільності матеріалу призводить до зниження його пористості, що, в свою чергу, впливає на зменшення електричного опору. Підкреслено, що контроль щільності стає ключовим чинником для забезпечення оптимальних показників електропровідності вуглець-вуглецевих композитних матеріалів.

Показано, що ущільнення ВВКМ значно покращує структуру заготовок і тиглів, підвищуючи їх фізичні та експлуатаційні характеристики. Це робить їх більш придатними для використання в умовах високих температур, агресивних середовищ, у виробництві термостійких компонентів та інших високотехнологічних областях.

Повторне ущільнення ВВКМ виявило суттєвий вплив на якість матеріалу. Показано, що збільшення щільності після додаткового ущільнення призводить до зниження пористості, покращення механічних властивостей і зміни розподілу пор у матеріалі, що позитивно впливає на його пористість та міцність.

Проведені стендові дослідження модельних зразків з ВВКМ показали, що збільшення уявної щільності матеріалу призводить до зниження його електричного опору. Для забезпечення контролю в промисловій практиці ефективним і доступним методом оцінки ступеня завершення кристалічних перетворень і визначення ступеня графітизації при високотемпературній обробці вуглецевих матеріалів рекомендовано порівняння електричного об'ємного питомого опору робочого зразка з еталонним.

Підкреслено важливість контролю параметрів щільності, пористості та електричного опору для оптимізації технологічних процесів і забезпечення високої якості кінцевих продуктів. Отриманні дані можуть бути корисними для застосувань у різних галузях промисловості.

Ключові слова: технологічний процес, вуглець-вуглецевий композиційний матеріал, заготовка, щільність, пористість, електричний об'ємний питомий опір.

I. Hurin, I. Nevlyudov, V. Ovcharenko, O. Tokarieva

INVESTIGATION OF THE DENSITY OF CCCM AND ITS INFLUENCE ON SPECIFIC VOLUME ELECTRICAL RESISTIVITY

This article investigates the structure and properties of carbon-carbon composite materials (CCCM), where the carbon matrix is formed by the deposition of pyrolytic carbon in the porous volume of a carbon fiber preform using thermogradient gas-phase pyrolysis densification technologies.

The results of studying the apparent density of CCCM by hydrostatic methods and its influence on the specific volume electrical resistivity of the material are presented. The conducted study established that the specific volume electrical resistivity of CCCM significantly depends on a number of factors, one of which is the material density. An increase in the apparent density of the material leads to a decrease in its porosity, which, in turn, affects the decrease in electrical resistance. It is emphasized that density control becomes a key factor in ensuring optimal electrical conductivity of carbon-carbon composite materials.

It is shown that the densification of CCCM significantly improves the structure of blanks and crucibles, increasing their physical and operational characteristics. This makes them more suitable for use in high-temperature conditions, aggressive environments, in the production of heat-resistant components and other high-tech areas.

Repeated densification of CCCM revealed a significant impact on the quality of the material. It is shown that an increase in density after additional densification leads to a decrease in porosity, improvement of mechanical properties and a change in the pore distribution in the material, which positively affects its porosity and strength.

Bench tests of model samples made of CCCM showed that an increase in the apparent density of the material leads to a decrease in its electrical resistance. To ensure control in industrial practice, an effective and affordable method for assessing the degree of completion of crystalline transformations and determining the degree of graphitization during high-temperature treatment of carbon materials is recommended to compare the specific volume electrical resistivity of the working sample with the reference one.

The importance of controlling the parameters of density, porosity, and electrical resistance to optimize technological processes and ensure high quality of final products is emphasized. The obtained data can be useful for applications in various industries.

Keywords: technological process, carbon-carbon composite material, blank, density, porosity, specific volume electrical resistivity.