

PACS numbers: 61.05.cp, 68.37.Hk, 81.05.U-, 81.07.De, 81.16.Dn, 82.70.Gg, 83.60.Np

Вплив магнетного поля на утворення нанорозмірного вуглецю у матрицях з пірогенного діоксиду Силіцію

В. В. Гончарук¹, В. М. Огенко², Л. В. Дубровіна¹

¹Інститут колоїдної хімії та хімії води ім. А. В. Думанського НАН України,
бульв. Академіка Вернадського, 42,
03142 Київ, Україна

²Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського НАН України,
просп. Академіка Палладіна, 32/34,
03142 Київ, Україна

Пористі наноккомпозити, що складаються з кремнезему та вуглецю, було одержано методом однореакторної синтези шляхом карбонізації натрій-карбоксиметилцелюлози (КМЦ) у матриці з пірогенного Силіцію діоксиду. Змішували пірогенний кремнезем (пірогенний Силіцію діоксид А-50, розмір частинок ≤ 80 нм, $S_{\text{шт}} = 50$ м²/г) і водний розчин КМЦ (натрійова сіль карбоксиметилцелюлози Acucell AF 3265). За рахунок процесу самоорганізації (self-assembly) у дисперсії із Силіцію діоксидом і КМЦ формування матриці та розміщення у ній макромолекул полімеру відбувалося одночасно. Крім того, додавали розчин NiCl₂ у етанолі як прекаталізатор. Одну частину (зразок SiO₂/C/Ni) одержаної дисперсії у закритому вмістищі розташовували на дерев'яному столі, а другу (зразок *m*/SiO₂/C/Ni) — на постійному магнеті та витримували добу. Як контрольний, зразок без додавання розчину NiCl₂ синтезували у тих же умовах (SiO₂/C). Потім вмістища відкривали та висушували дисперсії до утворення ксерогелю. Ксерогелі карбонізували за 750°C у потоці аргону впродовж 20 хв; швидкість нагріву складала 10 град/хв. Після карбонізації зразки набули чорного кольору. Методом РФА показано, що синтезовані наноккомпозити складаються з SiO₂, вуглецю у різних алотропних формах, відновленого до металевого стану ніклю та NaCl. Вивчення структури зразків за допомогою СЕМ показало, що візуально морфології зразків SiO₂/C й *m*/SiO₂/C/Ni практично ідентичні, тобто наноструктури вуглецю розташовані по поверхні частинок SiO₂. У зразків *m*/SiO₂/C/Ni на присутність відновлених частинок металевого ніклю вказує наявність більш контрастних сферичних частинок розміром менше 100 нм та їхніх скупчень. У зразках SiO₂/C/Ni, крім піровуглецю, який утворився на поверхні частинок SiO₂, присутні клубки з нанотрубок або волокон вуглецю розміром від 20 нм до 60 нм. На кінцях цих структур знаходяться наночастинки металевого ніклю розміром до

80 нм, що демонструє типове кінчикове каталітичне зростання нанотворень. Усі одержані композити є високопористими матеріалами; їхня позірна густина складає від $0,55 \text{ г/см}^3$ до $0,64 \text{ г/см}^3$. Проявом молекулярно-ситового ефекту є те, що відкрита пористість (від 73,3% до 55,2%) і вбирання розчинників зразками залежать від розміру молекул розчинника, по яких їх визначали. Найкращий ефект одержано для зразка SiO_2/C . Зразки $\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Ni}$ й $m/\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Ni}$, які мають у своєму складі металевий нікель, притягуються до постійного магнету, тобто вони виявляють ферромагнетні властивості.

Porous nanocomposites consisting of silica and carbon are obtained by the method of one-reactor synthesis by carbonization of sodium carboxymethyl cellulose (CMC) in a matrix of pyrogenic silicon dioxide. Fumed silica (fumed silicon dioxide A-50, particle size $\leq 80 \text{ nm}$, $S_{\text{sp}} = 50 \text{ m}^2/\text{g}$) and an aqueous solution of CMC (sodium carboxymethyl cellulose Acucell AF 3265) are mixed. Due to the process of self-assembly in the dispersion of silicon dioxide and CMC, the formation of the matrix and the arrangement of polymer macromolecules within it are occurred simultaneously. Additionally, a solution of NiCl_2 in ethanol is added as a precatalyst. One part (the $\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Ni}$ sample) of the obtained dispersion in a closed container is placed on a table, and the second part (the $m/\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Ni}$ sample) is placed on a permanent magnet and kept for a day. A sample of SiO_2/C is synthesized as a control under the same conditions without adding a NiCl_2 solution. Then, the containers are opened, and the dispersions are dried to form a xerogel. Xerogels are carbonized at 750°C in an argon stream for 20 min; the heating rate is of 10 degrees/min. After carbonization, the samples are acquired a black colour. The XRF method shows that the synthesized nanocomposites consist of SiO_2 , carbon in various allotropic forms, metallic nickel, and NaCl. Studying the structure of the samples using SEM shows that the visual morphologies of the SiO_2/C and $m/\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Ni}$ samples are practically identical, *i.e.*, the carbon nanostructures are located on the surface of the SiO_2 particles. In the $m/\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Ni}$ samples, the presence of metallic nickel particles is indicated by the presence of both brighter spherical particles smaller than 100 nm and their clusters. In the $\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Ni}$ samples, in addition to the pyrocarbon formed on the surface of the SiO_2 particles, there are tangles of carbon nanotubes or fibres ranging in size from 20 nm to 60 nm. At the ends of these formations, there are nanoparticles of metallic nickel up to 80 nm in size that demonstrates the typical catalytic tip growth of nanoformations. All obtained composites are highly porous materials; their apparent density ranges from 0.55 g/cm^3 to 0.64 g/cm^3 . A manifestation of the molecular-sieve effect is that the open porosity (from 73.3% to 55.2%) and the absorption of solvents by the samples depend on the size of the solvent molecules, by which they are determined. The best effect belongs to the SiO_2/C sample. The $\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Ni}$ and $m/\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Ni}$ samples, which contain metallic nickel, are attracted to a permanent magnet, *i.e.*, they have acquired ferromagnetic properties.

Ключові слова: пористі кремнезем-вуглецеві композити, пірогенний Силіцію діоксид, натрій-карбоксиметилцелюлоза, вуглецеві нанострук-

тури, нікелеві наночастинки, ефект постійного магнетного поля.

Key words: porous silica-carbon composites, fumed silica, sodium carboxymethyl cellulose, carbon nanostructures, nickel nanoparticles, effect of permanent magnetic field.

(Отримано 27 вересня 2024 р.)

1. ВСТУП

В даний час для вирішення проблем нанотехнологій як у фундаментальному, так і в прикладному значенні для створення нових поколінь функціональних і конструкційних наноматеріалів використовують різні напрями пошуку. Розробка наноматеріалів із заданими властивостями є достатньо складним науковим і практичним завданням, яке має забезпечувати взаємозв'язок фундаментальних особливостей наноматеріалів із взаємодією наноб'єктів на всіх рівнях ієрархії структури. Завдяки своїй унікальній наноструктурі та хемічним властивостям багатообіцяючим матеріалом для різноманітних застосувань став нановуглець. Для синтезу вуглецевих наноматеріалів, таких як вуглецеві нанотрубки, графен і фуллерени, використовують хемічне осадження з парової фази, відновлення оксиду графену, дуговий розряд і методи лазерної абляції. Для одержання нанокомпозитів на основі вуглецю застосовують методи змішування в розчині, полімеризації *in situ*, змішування в розтопі, електроформування та відновлення *in situ* [1–3].

Пористі неорганічні матеріали мають різноманітні застосування для очищення води, повітря та багатьох інших речовин, зокрема, в медицині як ентеро- і хемосорбенти, а також як носії каталізаторів та ін. Все це зумовлено їхніми експлуатаційними властивостями: хемічною інертністю, високою термічною стійкістю, міцністю, великим об'ємом пор за низької вартості виробництва та простоти використання. Для синтезу таких матеріалів з високим ступенем контролю їхніх структурних і текстурних властивостей найчастіше використовують матричний метод. Як шаблони у компоненти для синтезу додаються молекулярні або супрамолекулярні одиниці. Завдяки вдалому вибору процедури шаблонування за останні декілька років було досягнуто безпрецедентний контроль структур і текстур розміром від нанометрів до мікрометрів. У більшості робіт темплатну синтезу кремнезем-вуглецевих нанокомпозитів проводять шляхом імпрегнації та втілення у силікатні матриці полімерних композицій з подальшою карбонізацією їх і видаленням матриць [4–6].

З використанням колоїдного кремнезему як матриць, що утво-

рюються методом самоскладання (self-assembly) в присутності полімерів або за одночасного утворення їх, нами було одержано після карбонізації нановуглецеві частинки, тобто одержано кремнезем-вуглецеві наноматеріали, в тому числі нанотрубки [7, 8].

В останні роки з'явилося багато робіт з вивчення впливу магнетного поля на структуру та властивості води, водних розчинів і розчинів полімерів. У присутності магнетного поля змінюється конформація деяких полімерних макромолекул, що зумовлено анізотропією їхньої магнетної сприйнятливості. Накладання магнетного поля на розчини полімерів приводить до додаткової орієнтації макромолекул, особливо поблизу рідкокристалічного фазового переходу. Для водних розчинів деяких ефірів целюлози було виявлено, що накладання магнетного поля приводить до помітного збільшення в'язкості розчинів, що пов'язане з орієнтацією макромолекул у полі та процесами додаткового структуроутворення між молекулами води та макромолекулами за рахунок гідрогенових зв'язків. За магнетного оброблення воднодисперсних систем також відбувається зміна фізико-хімічних показників, що вказує на вплив магнетного поля на їхню структуру [9–13].

Метою даної роботи було вивчення впливу постійного магнетного поля на утворення нановуглецевих структур у матриці з пірогенного кремнезему та водних розчинів карбоксиметилцелюлози після карбонізації.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Матеріали. Як структуроутворювальний компонент для одержання композитних матриць використовували пірогенний Силіцію діоксид (Калуш, А-50, розмір частинок ≤ 80 нм, $S_{\text{пит}} = 50$ м²/г). Полімерним прекурсором піровуглецю слугувала натрійова сіль карбоксиметилцелюлози (КМЦ, Нідерланди, Acucell AF 3265, харчова, ступінь заміщення 0,7–0,85). Як прекаталізатор використано Ніклю хлорид $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (хч). Розчинниками були дистильована вода й етанол.

Методика одержання нанорозмірного вуглецю у матрицях. У скляне вмістище, що містило 30 мл 1%-розчину КМЦ в дистильованій воді додавали 4 г А-50 (зразок SiO_2/C) і 1 мл 12%-розчину NiCl_2 в етанолі, перемішували 15 хв. за швидкості у 3000 об/хв. Одержаний гель [14] розділили на дві рівні частини й одну (зразок $\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Ni}$) залишали на лабораторному столі, а іншу (зразок $m/\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Ni}$) розміщували на залізо-кобальт-ніобійовому постійному магнеті з мідно-ніклевим покриттям, напруженість поля якого на полюсах становила 77 Тл. Закриті кришками зразки витримували у таких умовах добу, після чого

знімали кришки та висушували зразки за кімнатної температури на повітрі. Висушені зразки карбонізували за 750°C у потоці аргону упродовж 20 хв.; швидкість нагріву складала 10 град/хв. Таким чином було одержано пористі неорганічні наноккомпозити. **Методи дослідження складу, структури та властивостей наноккомпозитів.** Позірну густину ($d_{\text{пор}}$) визначали ваговим методом, виходячи з геометричних розмірів зразків. Відкриту пористість наноккомпозитів (W , %) і вбирання цих розчинників зразками визначали за поглинанням (p , см³/г) органічних розчинників у статичних умовах після витримки їх упродовж 1 доби у відповідному розчиннику за кімнатної температури [15]. Склад наноккомпозитів вивчали методом рентгенофазової аналізи (РФА) на автоматичному дифрактометрі ДРОН-3М з джерелом випромінювання CuK_α ($\lambda = 1.54178 \text{ \AA}$) у діапазоні кутів 2θ від 5° до 70°. Віднесення рефлексів на дифрактограмах було зроблено на підставі бази даних програмного забезпечення Match!, що відноситься до ідентифікації фаз порошкових дифрактограм. Морфологію зразків досліджували за допомогою сканувального електронного мікроскопа JSM-6700F (JEOL, Японія). Попередньо на поверхню зразків напорошували платинову плівку завтовшки у 30 Å. Зйомка виконувалася в режимі SEI за пришивидшувальної напруги у 10 кВ і струму зонда у 0,65 нА.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Використання неорганічних матриць для синтезу наноматеріалів зумовлює розмір і форму наноструктур і забезпечує збереження їх за рахунок ізоляції частинок стінками пор. Якщо для одержання нановуглецю використовують твердофазну карбонізацію полімерів, то їх, як правило, наносять у вигляді тонкого шару на пористу матрицю. Під час термічного розкладання полімерного прекурсора у твердій фазі утворюються такі вуглецеві структури, як активоване вугілля, молекулярні сита, волокна та ін. Формування тієї чи іншої структури піровуглецю залежить від структурних характеристик матриць, концентрації та складу полімеру та проміжних продуктів карбонізації [16, 17].

Ми використовували пірогенний кремнезем і водний розчин КМЦ одночасно; тому за рахунок процесу самоорганізації (self-assembly) формування матриці із Силіцій діоксиду та розташування у ній макромолекул полімеру відбувалось одночасно. Під час нагріву одержаного після висушування ксерогелю відбувається піроліза з утворенням різноманітних форм вуглецю та низькомолекулярних газоподібних сполук. Після карбонізації зразки набувають чорного забарвлення.

На рисунку 1 представлено результати дослідження складу

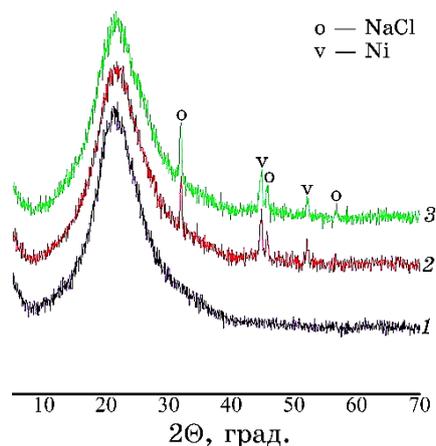


Fig. 1. Дифрактограми кремнезем-вуглецевих зразків SiO_2/C (1), $m/\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Ni}$ (2) та $\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Ni}$ (3).¹

одержаних матеріалів методом РФА. На дифрактограмах є широкий пік при 2θ у $15\text{--}30^\circ$, який відповідає аморфному Силіцію діоксиду та рефлексам від аморфного вуглецю, вуглецевих нановолокон, трубок і графіту. Також присутні рефлекси від металевого Ніклю та NaCl. Появу рефлексів від фази металевого Ніклю зумовлено відновленням Ni^{2+} з Ніклю хлориду газоподібними сполуками, які утворилися під час піролізу КМЦ. Металевий нікель є каталізатором утворення нанотрубок з органічних сполук; особливо яскраво ці властивості виявляються за його осадження на поверхню SiO_2 . Утворення NaCl перебігає як за реакції обміну між КМЦ і NiCl_2 у розчині, внаслідок чого утворюється сіль Нікарбоксиметилцелюлози і NaCl, так і під час карбонізації КМЦ та розкладання NiCl_2 [18, 19].

На рисунку 2 наведено мікрофотографії одержаних зразків наноматеріалів. Як видно з наведених даних (рис. 2, а, б), візуально морфології зразків SiO_2/C і $m/\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Ni}$ є практично ідентичними, тобто наноструктури вуглецю розташовані по поверхні частинок SiO_2 . Але частинки наноконкомпозиту, який утворився під час карбонізації тільки КМЦ, упаковані більш щільно, ніж у зразка, який одержано за карбонізації суміші розчинів КМЦ і NiCl_2 , хоча присутні пори більших розмірів. На присутність металевого Ніклю у зразку $m/\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Ni}$ вказує наявність більш яскравих шароподібних частинок розміром менше 100 нм та їхніх скупчень. З рисунку 2, в, г видно, що, крім піровуглецю, який утворився на поверхні частинок SiO_2 у зразку $\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Ni}$, присутні клубки з нанотрубок або волокон вуглецю розміром від 20 нм до 60 нм. На кінцях трубок знаходяться наночастинки металевого-

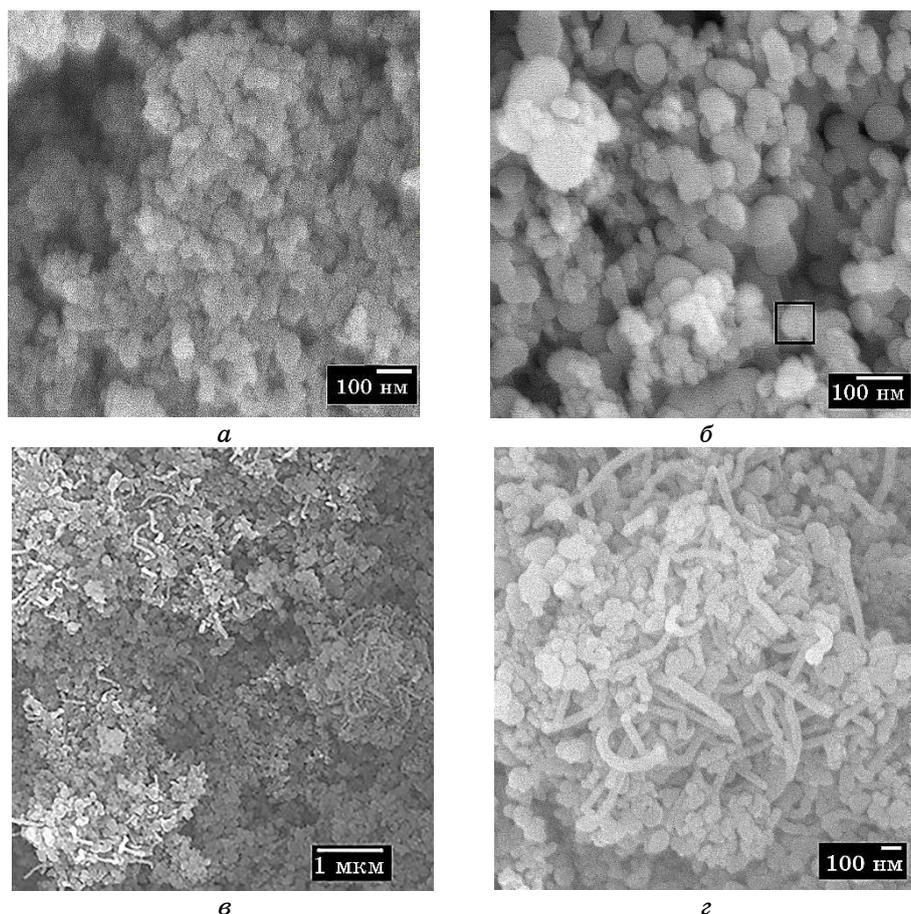


Fig. 2. СЕМ-мікрофотографії кремнезем-вуглецевих наноконкомпозитів SiO_2/C (a), $m/\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Ni}$ (b) та $\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Ni}$ (c, d).²

го ніклю розміром до 80 нм, що демонструє типове каталітичне кінчикове зростання наноутворень [20, 21]. Слід зазначити, що зразки вуглець-кремнеземних композитів $m/\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Ni}$ та $\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Ni}$ після карбонізації набули внаслідок присутності частинок металевого ніклю феромагнетних властивостей — вони притягуються до постійного магнету.

Одержані результати можна пояснити тим, що КМЦ є поліелектролітом, і її концентровані водні розчини є просторовою флюктуаційною сіткою зі стиснутих клубків макромолекул, тобто гелем, утворення якого зумовлено наявністю Кулонових і гідрофобних взаємодій, водневими зв'язками та взаємодією йонів Na^+ і COO^- груп макромолекули. У присутності пірогенного кремнезе-

ТАБЛИЦЯ. Властивості кремнезем-вуглецевих композитів.³

зразок	$d_{\text{пор.}}$, Г/см ³	CCl ₄		гексан		бензол	
		ван-дер-Ваальсів \varnothing молекул, нм [25]					
		0,61–0,69		0,67		0,59	
		W, %	p, см ³ /Г	W, %	p, см ³ /Г	W, %	p, см ³ /Г
SiO ₂ /C	0,55	64,1	1,08	66,7	1,12	73,3	1,53
SiO ₂ /C/Ni	0,64	62,7	1,06	64,5	1,04	67,5	1,07
m/SiO ₂ /C/Ni	0,57	55,2	1,02	57,9	1,01	62,4	1,05

му на його поверхні відбувається адсорбція як окремих макромолекул КМЦ, так і їхніх клубків. Під час реакції йонів Ni²⁺ з макромолекулами КМЦ утворюється водонерозчинна сіль Ni-КМЦ, яка може перешкоджати зміні конформації макромолекул полімеру в розчині, що приведе за карбонізації зразків до утворення клубків нанотрубок або волокон (рис. 2, в, з) [22–24].

У присутності магнетного поля під його впливом анізотропні структури обертаються під дією магнетного моменту, внаслідок чого проходить певна переорієнтація макромолекул паралельно до ліній поля магнетної індукції, що приводить до додаткового впорядкування структури дисперсії SiO₂-водний розчин КМЦ, і локальна концентрація полімеру стає недостатньою для утворення нанотрубок або волокон [11].

У таблиці представлено властивості одержаних карбонвмісних композитів. З таблиці видно, що композити є високопористими матеріалами, тому що їхня густина істотно нижча, ніж густина аморфного Силіцію діоксиду та графіту (2,20 г/см³ і 2,27 г/см³ відповідно), а їхня структура залежить від складу та способу одержання.

Як видно з наведених даних, утворення металевого ніклю у зразках приводить до збільшення позірної густини. Залежність відкритої пористості зразків і кількості абсорбованих розчинників від розміру їхніх молекул свідчить про наявність молекулярно-ситових властивостей. Найбільш яскраво ці властивості проявляються у зразків, яких одержано без Ніклю хлориду, тобто утворення частинок металевого ніклю впливає на розмір або кількість пор у зразках.

Одержані пористі неорганічні наноккомпозити з магнетними властивостями можуть знайти достатньо широке застосування як сорбенти, носії каталізаторів та ін.

4. ВИСНОВКИ

Синтезовано вуглець-кремнеземні пористі наноккомпозити шля-

хом карбонізації натрійової солі карбоксиметилцелюлози (КМЦ) в матриці пірогенного Силіцію діоксиду з NiCl_2 . Формування частини зразків проводили на постійному магнеті. Показано, що після карбонізації ксерогелю з суміші нанорозмірного SiO_2 і водного розчину КМЦ утворюється композит, в якому частинки Силіцію діоксиду покриті шаром піровуглецю. Додавання у вихідну дисперсію розчину NiCl_2 в етанолі привело (після висушування та карбонізації) до одержання композитів з частинками металевого ніклю розміром менше 100 нм. У зразку, структура якого формувалась у магнетному полі, утворився шар піровуглецю на структурних складових матриці. У іншого зразка, який формувався у звичайних умовах, крім тонкого шару піровуглецю, утворилися вуглецеві нанотрубки або волокна розміром у 20–60 нм з частинками металевого ніклю розміром у 80 нм на їхніх кінчиках. Всі зразки мають високу відкриту пористість (від 73,3% до 55,2%) і проявляють молекулярно-ситові властивості.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. *Synthesis and Applications of Nanocarbons* (Eds. J.-C. Arnault and D. Eder) (John Wiley & Sons, Ltd.: 2021); <https://doi.org/10.1002/9781119429418>
2. F. Haque and Md. Z. Rahman, *Compr. Mat. Proc.*, **7**: 48 (2024); <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96020-5.00275-2>
3. G. Speranza, *Nanomaterials*, **11**, No. 4: 967 (2021); <https://doi.org/10.3390/nano11040967>
4. I. K. Tetteh, I. Issahaku, and A. Y. Tetteh, *Carbon Trends*, **14**: 100328 (2024); <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2024.100328>
5. F. Schüth, *Angew. Chem. Int. Edit.*, **42**, No. 31: 3604 (2003); <https://doi.org/10.1002/anie.200300593>
6. N. D. Shcherban and V. G. Ilyin, *Him. Fiz. Tehnol. Poverhni*, **6**, No. 1: 97 (2015) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.15407/hftp06.01.097>
7. L. V. Dubrovina, V. M. Ogenko, O. V. Naboka, V. O. Dymarchuk, Ya. V. Zaulychnyy, and O. Yu. Khyzhun, *Inorg. Mat.*, **44**: 697 (2008); <https://doi.org/10.1134/S0020168508070054>
8. L. Dubrovina, O. Naboka, V. Ogenko, P. Gatenholm, and P. Enoksson, *J. Mater. Sci.*, **49**: 1144 (2014); <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7793-8>
9. M. Orlyuk, Yu. Kurnikov, V. Drukarenko, and V. Yakuhno, *16th Intern. Conf. 'Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment'* (Nov. 15–18, 2022) (Kyiv: EAGE: 2022), vol. **2022**, p. 1; <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580187>
10. V. V. Shilov and V. V. Tsukruk, *Struktura Polimernykh Zhidkikh Kristallov* [Structure of Polymer Liquid Crystals] (Kiev: Naukova Dumka: 1990) (in Russian).
11. Tsunehisa Kimura, *Polym. J.*, **35**, No. 11: 823 (2003); <https://doi.org/10.1295/polymj.35.823>
12. V. Goncharuk and L. Dubrovina, *Russ. J. Appl. Chem.*, **93**, No. 7: 1019 (2020); <https://doi.org/10.1134/S1070427220070113>

13. S. Vshivkov and E. Rusinova, *Polymer Rheology* (Eds. Jose Luis Rivera Armenta and Beatriz Adriana Salazar Cruz) (IntechOpen: 2018); <https://doi.org/10.5772/intechopen.72137>; *idem*, *Magnetorheology of Polymer Systems C*, **1**: 3 (2018); <https://www.intechopen.com/chapters/60958>
14. R. Iler, *Chemistry of Silica. Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties and Biochemistry of Silica* (New York: John Wiley: 1979).
15. A. T. Volochko, K. B. Podbolotov, and Ye. M. Dyatlova, *Ogneupornyye i Tugoplavkie Keramicheskie Materiali* [Refractory and Refractory Ceramic Materials] (Minsk, Belarus: Navuka: 2013) (in Russian).
16. T. Kyotani, *B. Chem. Soc. Jpn.*, **79**, No. 9: 1322 (2006); <https://doi.org/10.1246/bcsj.79.1322>
17. G. Che, B. B. Lakshmi, C. R. Martin, E. R. Fisher, and R. S. Ruoff, *Chem. Mater.*, **10**, No. 1: 260 (1998); [doi:10.1021/cm970412f](https://doi.org/10.1021/cm970412f)
18. V. V. Chesnokov and R. A. Buyanov, *Russ. Chem. Rev.*, **69**, No. 7: 675 (2000); <https://doi.org/10.1070/RC2000v069n07ABEH000540>
19. S. Takenaka, S. Kobayashi, H. Ogihara, and K. Otsuka, *J. Catal.*, **217**, No. 1: 79 (2003); [https://doi.org/10.1016/S0021-9517\(02\)00185-9](https://doi.org/10.1016/S0021-9517(02)00185-9)
20. F. A. Gavanini, M. Lopez-Damian, D. Rafieian, K. Svensson, and P. Enoksson, *Sensor Actuat. A-Phys.*, **172**, No. 1: 347 (2011); <https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.04.036>
21. J. Zhu, J. Jia, and F.-L. Kwong, *Carbon*, **50**, No. 7: 2504 (2012); <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.01.073>
22. Yu. S. Lipatov, *Fiziko-Khimicheskie Osnovy Napolneniya Polimerov* [Physico-Chemical Basis of Polymer Filling] (Moskva: Khimiya: 1991) (in Russian).
23. G. A. Petropavlovskii, *Gidrofilnyye Chastichnozameshchyonnyye Ehfiry Tsellyulozy i Ikh Modifikatsiya Putyom Khimicheskogo Sshivaniya* [Hydrophilic Partially Substituted Cellulose Ethers and Their Modification by Chemical Crosslinking] (Leningrad: Nauka: 1988) (in Russian).
24. C. G. Lopez, S. E. Rogers, R. H. Colby, P. Graham, and J. T. Cabral, *J. Polym. Sci. B Pol. Phys.*, **53**, No. 7: 492 (2015); <https://doi.org/10.1002/polb.23657>
25. A. M. Koganovskii, N. A. Klimenko, T. M. Levchenko, and I. G. Roda, *Adsorbtsiya Organicheskikh Veshchestv iz Vody* [Adsorption of Organic Substances from Water] (Leningrad: Khimiya: 1990) (in Russian).

¹A. V. Dumansky Institute of Colloid and Water Chemistry, N.A.S. of Ukraine, 42, Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine

²V. I. Vernadsky Institute of General and Inorganic Chemistry, N.A.S. of Ukraine, 32/34, Academician Palladin Ave., UA-03142 Kyiv, Ukraine

¹ Fig. 1. XRD patterns of silica-carbon samples SiO₂/C (1), m/SiO₂/C/Ni (2), and SiO₂/C/Ni (3).

² Fig. 2. SEM image of silica-carbon nanocomposites SiO₂/C (a), m/SiO₂/C/Ni (б), and SiO₂/C/Ni (в, г).

³ TABLE. Properties of silica-carbon composites.