

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2024.05.026>

УДК 661.762:546.28:541.6:615.46

В.Д. Кліпов, <https://orcid.org/0000-0002-5634-1512>

І.В. Кононко, <https://orcid.org/0000-0003-1976-7116>

Н.В. Бошицька, <https://orcid.org/0000-0003-2241-1161>

В.П. Сергєєв, <https://orcid.org/0000-0001-9417-2548>

Н.В. Кононко, <https://orsid.org/0000-0002-2069-0540>

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

E-mail: nata25lia@gmail.com

Вуглецева волокниста кремнієвмісна композиційна матриця для розроблення сучасних бактерицидних аплікаційних засобів у хірургії

Представлено членом-кореспондентом НАН України О.М. Григор'євим

Відпрацьовано технологію отримання вуглецевої волокнистої композиційної матриці з діоксидом кремнію (ВВККМ) для медичного призначення і описано алгоритм її виготовлення. Досліджено вплив структуро-твірної домішки на умови утворення золи та структурно зв'язаного прошарку діоксиду кремнію в розробленому матеріалі. Параметри пористої структури вуглецевого волокна ВВККМ вивчено ексікаторним методом за поглинанням парів бензолу. Мікроструктуру поверхневого та приповерхневого шарів з вмістом діоксиду кремнію в зразках композиційної матриці досліджено за допомогою сканівного електронного мікроскопа, що дало змогу визначити місце розташування прошарку з діоксиду кремнію в структурі композита і окремих включень на його поверхні. Виявлено агрегацію діоксиду кремнію в дрібнодисперсній волокноподібній структурі після 100 % випалу вуглецевої складової під час золотворення за температури 1073 К. Проаналізовано форму та розміри частинок діоксиду кремнію, а також морфологію їх поверхні. Методами енергодисперсійного рентгенівського аналізу і аналітичної хімії доведено, що включення мінералів на поверхні мікроволокон ВВККМ є частинками кремнію та діоксиду кремнію. Новизна запропонованої технології полягає у модифікації структури ВВККМ додатковою складовою, що дає підстави вважати її особливим класом вуглецевих композиційних матеріалів. В отриманій ВВККМ частинки SiO_2 завбільшки

Цитування: Кліпов В.Д., Кононко І.В., Бошицька Н.В., Сергєєв В.П., Кононко Н.В. Вуглецева волокниста кремнієвмісна композиційна матриця для розроблення сучасних бактерицидних аплікаційних засобів у хірургії. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2024. № 5. С. 26—37. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2024.05.026>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2024. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

~100—500 нм забезпечують лікувальні та бактерицидні властивості, сприяють клітинній регенерації ранової поверхні, знешкоджують бактеріальні клітини. Це дає можливість використовувати ВВКМ для виготовлення бактерицидних аплікаційних засобів під час лікування гнійно-ускладнених бактеріальних уражень в умовах і польової, і стаціонарної хірургії.

Ключові слова: вуглецева волокниста композиційна матриця, модифікація вуглецевої волокнистої композиційної матриці діоксидом кремнію, біомедичне призначення.

Вступ. За умов глобальних викликів у світі та воєнної агресії в Україні одним із найактуальніших завдань медичної науки є зниження смертності поранених з відкритими ушкодженнями та гнійними ранами, зокрема шляхом застосування сучасних бактерицидних аплікаційних медичних засобів. Їх розроблення передбачає створення новітніх матеріалів з комплексом необхідних фізико-хімічних і медико-біологічних властивостей. Останнім часом широко застосовують вуглецеві матеріали на основі похідних целюлози, що зумовлено їхніми унікальними властивостями — біосумісністю, високою пористістю, відсутністю токсичності та канцерогенності, незмінністю властивостей під впливом біологічних середовищ [1].

Відомо, що мембрани на основі целюлози є одними з найкращих варіантів пов'язок під час лікування опікових ран і виразок на шкірі [2]. Хімічний склад цих матеріалів обмежується вуглецем, золою, воднем, киснем та діоксидом кремнію [1].

Відомо також, що біоматеріали на основі кремнію мають відмінну біосумісність, високу площу поверхні, механічну міцність і селективність залежно від їх застосування, у тому числі плівку, гідрогель, наночастинки тощо. Вони також добре показали себе під час вирішення завдань, пов'язаних з культурою і ростом клітин та тканинною інженерією [3, 4]. Завдяки цьому кремнієвісні матриці вже застосовують у хірургії для загоєння ран і регенерації шкіри [5]. Вивчено також вплив пористих, морфологічних і хімічних характеристик синтетичних кремнеземів на біоактивність гідрогелів гібридних ранових пов'язок [6]. Нещодавно було розроблено нову целюлозну мембрану, об'єднану з частинками мезопористого кремнезему (SBA-15). Її застосовують як антимікробну ранову пов'язку пролонгованої дії [2].

Загалом кремній широко використовується в різних галузях промисловості, включаючи клінічні та біомедичні застосунки [3, 7]. Масштабність наукових досліджень ролі кремнію та його сполук свідчить про підвищену увагу вчених різних спеціальностей, зокрема медиків і біологів, оскільки медико-біологічна значущість кремнію в житті на всіх рівнях його організації потребує поглибленого вивчення [8, 9]. Зокрема, унікальні електрохімічні властивості кремнію дають йому можливість адсорбувати на своїй поверхні віруси та бактерії збудників багатьох хвороб. Адсорбційна активність притаманна також діоксиду кремнію (SiO_2) щодо речовин білкової природи, токсичних продуктів неповного розпаду великих органічних сполук, патогенних антигенів та алергенів мікробного чи іншого походження.

Останнім часом особлива увага дослідників прикута до нанорозмірних частинок SiO_2 , які розглядаються як перспективний, біосумісний та біодеградований матеріал, що може використовуватися під час створення лікарських засобів широкого спектра дії [5, 10]. Повідомляється також, що наночастинки кремнію здатні адгезувати поверхні бактерій *Escherichia coli* та згубно впливати на них. Так, клітини *E.coli*, екрановані наночастинками кремнію, активніше руйнуються макрофагами вже через 30 хв контакту з ними [4].

Таким чином, **мета** дослідження полягала у створенні вуглецевої волокнистої матриці з поверхневим шаром діоксиду кремнію для забезпечення аплікаційного матеріалу медичного призначення регенерувальним та бактерицидним ефектом.

Матеріали та методика досліджень. Під час розроблення процесу модифікації вуглецевої волокнистої кремнієвмісної композиційної матриці (ВВККМ) було використано такі матеріали:

а) гідратцелюлозне волокно (ГЦВ) у вигляді нитки віскозної кордної № 5,45/2, яку виробляє фірма Barnet Europe W. Barnet GmbH & Co. KG;

б) структуротвірна кремнієорганічна домішка (СКД) на основі лаку КО-921, який навіть за кімнатної температури утворює плівку внаслідок випаровування розчинника. Затвердіння такої плівки відбувається за підвищеної температури (в інтервалі 573—593 К);

в) нитка комплексна багатоволокниста у вигляді нитки вуглецевої № 5,45/2;

г) вуглецева волокниста кремнієвмісна композиційна матриця у вигляді зразка текстильної (трикотажної) структури із сумарним об'ємом пор $V_s \sim 1,0 \text{ см}^3/\text{г}$ (випал 67 %) з масовою часткою вологи не більше 10 % і рН водної витяжки 6,0–8,0.

Технологію відпрацьовували в реакційній комірці завбільшки $0,2 \times 0,1 \times 0,005 \text{ м}$ із знекисненим середовищем. Комірку заповнювали ГЦВ на 2 % її об'єму, що відповідало 0,018 кг. Зразки термічно обробляли в діапазоні температур 373—1173 К впродовж 8 год.

Активацію термічно оброблених зразків проводили у вертикальній установці парогозової активації за температури активації 1023—1273 К впродовж 20 хв.

Фізико-хімічні, структурні та сорбційні характеристики ВВККМ залежали від умов їх формування. Випал (ступінь обгару) як характеристичний показник активованих вуглецевих матеріалів визначали за втратою ваги матеріалу після впливу відновно-окиснювального середовища. Випал досліджуваних зразків змінювали до значень від 20 до 67 ваг. %. Збільшення випалу супроводжувалося руйнуванням зразків до порошкоподібного стану із зниженням вмісту вуглецевої складової і його зростанням щодо зольного залишку. Повноту випалу оцінювали за вмістом вуглецю в зольному залишку та за масовою часткою золи (згідно з ГОСТ 12596—67), а ступінь випалу — за зміною показника сорбційної ємності за бензолом. Структуру ВВККМ досліджували методом пошарового випалу вуглецевих мікроволокон у кисневому середовищі за температури 1073 К протягом 2 год до отримання золи. Елементний склад золи визначали її хімічним аналізом на поверхні мікроволокна, а також загальним хімічним аналізом самого мікроволокна та золи.

Параметри пористої структури вивчали ексикаторним методом за об'ємом поглинутих парів бензолу (ГОСТ 5955—75). Для цього аналізований зразок масою близько 1,2 г висушували у термошафі за температури $(200 \pm 10)^\circ\text{C}$ впродовж 1 год, зважували його з точністю до 10^{-3} г і, помістивши у попередньо зважену склянку, розміщали в ексикаторі 2-250 (ГОСТ 25336—82), до якого наливали $150\text{—}200 \text{ см}^3$ бензолу. Щільно закритий кришкою ексикатор витримували в термостаті впродовж 20—24 год за температури $(24 \pm 2)^\circ\text{C}$. Після цього склянку з матеріалом витягали з ексикатора і зважували. Сорбційну ємність за бензолом (V_s) обчислювали за формулою, $\text{см}^3/\text{г}$:

$$V_s = \frac{m_3 - m_2}{(m_2 - m_1)\rho},$$

де m_1 — вага склянки для зразка; m_2, m_3 — вага склянки зі зразком до та після контакту з парами бензолу, г; ρ — густина бензолу, яка за температури 20°C дорівнює $0,879 \text{ г/см}^3$. За

результат приймали середнє арифметичне значення двох паралельних визначень. Розбіжність між двома паралельними замірами не перевищувала $0,08 \text{ см}^3/\text{г}$. За довірчої ймовірності 0,95 допустима похибка замірів не перевищувала $\pm 0,05 \text{ см}^3/\text{г}$.

Мікроструктуру досліджували з використанням сканівного електронного мікроскопа Mira 3 LMU ("Tescan", Чехія).

Склад елементів у волокні визначали енергодисперсійним рентгенівським аналізом, а для визначення хімічного складу зразків використовували методи аналітичної хімії.

Результати досліджень та їх обговорення. Для отримання ВВККМ для медичного призначення застосували періодичний багатоопераційний технологічний процес. Він розпочинався з просочування вихідної сировини (ткана структура з ГЦВ) структуротвірною кремнієорганічною домішкою, яка формувала на поверхні ГЦВ плівку, під якою постадійно відбувалися сталі у часі процеси термодеструкції та багатоступеневої карбонізації в знекисненому середовищі із перетворенням ГЦВ у вуглецеві волокна, які можна описати такою послідовністю етапів.

1. На початку карбонізації ГЦВ за температур 373—493 К під плівкою СКД відбувався гідроліз целюлози із видаленням через кремнієорганічний прошарок води і продуктів розкладу з кислотними властивостями, які є каталізаторами гідролітичної деструкції целюлози [11].

2. За температур 493—573 К під плівкою СКД попри її усадку і по довжині, і по товщині відбувалася інтенсивна і глибока деструкція полімеру, що супроводжувалося втратою ваги, зниженням ступеня полімеризації, міцності, питомої ваги, усадкою волокон по довжині та діаметру. При цьому утворювалася велика кількість газоподібних продуктів, які випаровувалися через прошарок СКД. Одночасно смолоподібні продукти розкладу ГЦВ затримувалися під плівкою СКД, збагачуючи твердий залишок (кокс) вуглецем [12].

3. Подальше підвищення температури до 603—723 К, спричиняло гранулярне руйнування плівки СКД із видаленням з неї летких продуктів, що призводило до утворення на поверхні і у приповерхневому шарі вуглецевих мікрОВОЛОКОН із скупчень частинок діоксиду кремнію. Одночасно формувалася порувата структура вуглецевої складової.

4. За подальшої термічної обробки вуглецевих волокон за температур 723—773 К з урахуванням структурних перетворень СКД формувалася ВВККМ.

5. Для отримання високопоруватої поверхні ВВККМ здійснювали її парогазову активацію в інтервалі температур 1023—1273 К впродовж 20 хв. Зростання часу перебування матеріалу в реакційній зоні призвело до випалу 67 %, внаслідок чого відбувалася втрата маси зі зниженням міцності, а сорбційна ємність пор збільшувалася (табл.1).

Таблиця 1. Сорбційні характеристики досліджених зразків вуглецевого волокна та ВВККМ

Найменування матеріалу	Випал, %	Сорбційна ємність за бензолом, $\text{см}^3/\text{г}$
Вуглецеве волокно	0	0,01
ВВККМ	20	0,40—0,42
ВВККМ	30	0,36—0,37
ВВККМ	45	0,59—0,71
ВВККМ	67	0,90—1,01

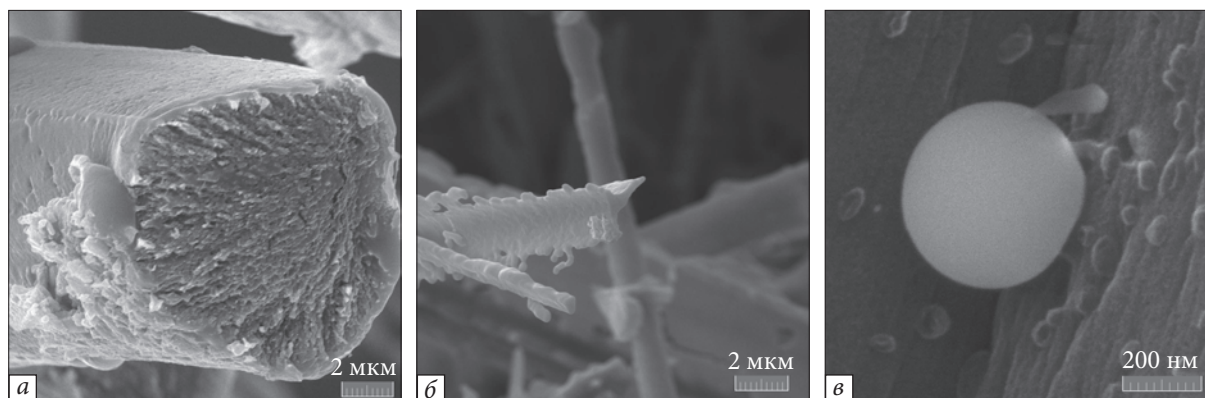


Рис. 1. Загальний вигляд плівки СКД по периметру вуглецевого мікрОВОлокна (а) та оплавлені частинки мінеральної складової (золи) у вигляді голко- (б) та сфероподібних (в) утворень на поверхні мікрОВОлокна

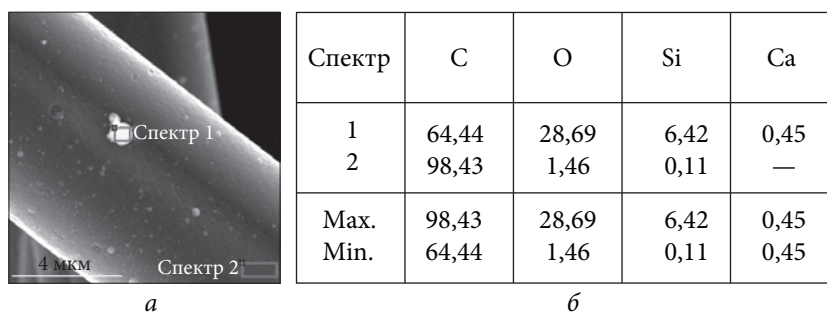


Рис. 2. Загальний вигляд вуглецевого мікрОВОлокна з кремнієвмісними включеннями на його поверхні (а) і елементний склад включень (ваг. %) у довільно обраних точках (б)

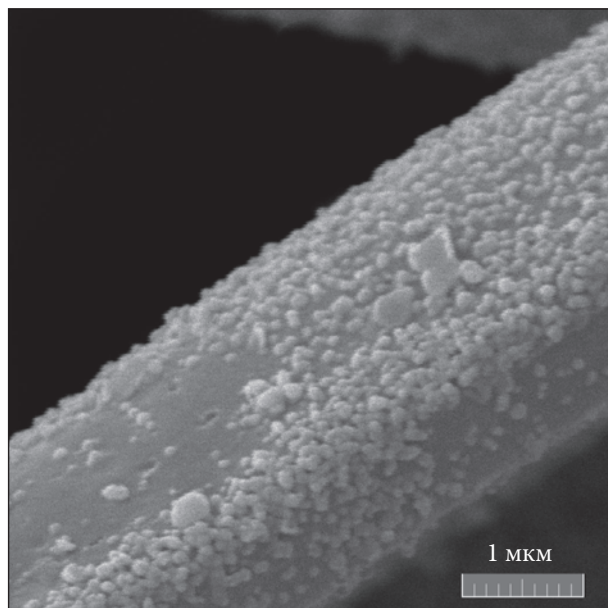
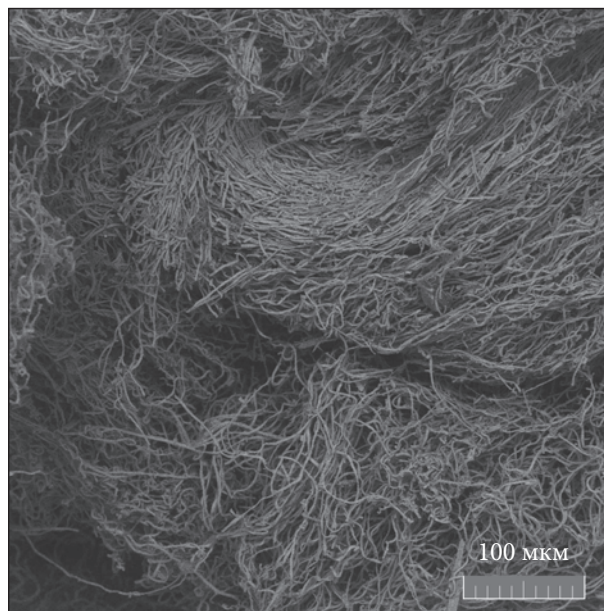


Рис. 3. Морфологія підповерхневого структурного прошарку діоксиду кремнію після усунення верхнього шару вуглецю на мікрОВОлокні (після 10 % випалу)

Рис. 4. Загальний вигляд структури золи за наявності кремнію у комплексних нитках тканини, яка збереглася після 100% випалу вуглецю



Парогазова активація дала змогу отримати ВВКМ, в основі якої композиційний вуглецевий матеріал, який структурно зв'язаний з приповерхневим гранулярним прошарком діоксиду кремнію. Це підтверджують нижче викладені результати досліджень.

З метою вивчення мінерального складу розробленої ВВКМ і виявлення залишку СКД після завершення процесу волокнотворення дослідили зольну складову методом пошарового випалу структури мікрОВОЛОКОН у кисневому середовищі з подальшими мікроскопічними дослідженнями та хімічним аналізом отриманих складників. Мікроскопічні дослідження показали, що зольна складова ВВКМ знаходиться в капілярно-поруватій області міжволоконного простору (рис. 1, а) у вигляді склоподібних голок (рис. 1, б), а на поверхні мікрОВОЛОКОН — у вигляді оплавлених склоподібних частинок сферичної форми (рис. 1, в).

Результати енергодисперсійного точкового елементного аналізу вищезгаданих поверхневих включень мінеральної складової підтвердили наявність кремнію в їх складі (рис. 2).

Щоб усунути з поверхні розробленого матеріалу частинки мінеральної складової голкоподібної форми, що можуть спричинити травматичний ефект під час медичного застосування, здійснили диспергування ВВКМ у дистильованій воді, що дало змогу отримати однорідне мікрОВОЛОКНО.

Дослідження мінеральної складової (золи) методом пошарового випалу вуглецю зі зразка ВВКМ показали, що в результаті часткового 10 % (протягом 10 хв) та повного 100 % (протягом 30 хв) випалу зразка ВВКМ за температури 1073 К утворювалася мінеральна складова із золи ГЦВ та золи, що сформувалася із СКД. Підтвердили, що у кремнієвісній складовій (після 10 % випалу ВВКМ для видалення верхнього шару вуглецю) на поверхні волокон візуалізувався поверхневий структурний прошарок із лускоподібних частинок діоксиду кремнію неправильної форми (рис. 3). Припустили, що ці частинки утримуються на поверхні мікрОВОЛОКНА завдяки наявності смолоподібних продуктів піролізу.

Подальший випал ВВКМ до 100 % показав, що загальний вигляд золи після повного видалення вуглецю повністю відтворив початкову текстильну структуру та волокнисту будову вуглецевої складової матеріалу (рис. 4).

Щоб виявити особливості морфології поверхні волокнистої структури золи за повного 100 % випалу вуглецю з ВВКМ провели подальші мікроскопічні та аналітичні дослідження (рис. 5). З рис. 5 очевидно, що 100 % випал для вигорання вуглецю з мікрОВОЛОКОН

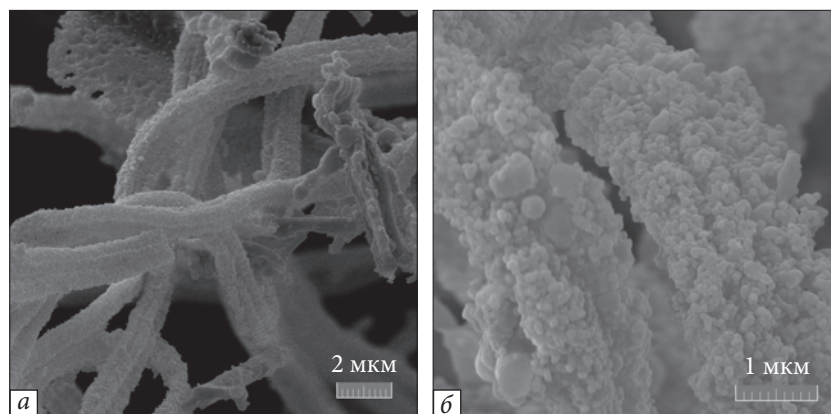


Рис. 5. Зовнішній вигляд волокнистої структури золи (а) і морфологія її поверхні з вмістом кремнію (б)

ВВКМ призвів до ущільнення частинок кремнієвмісної складової в приповерхневому прошарку. В результаті утворилося кремнієве порувате “волокно”, яке складалося з окремих агрегатів неправильної форми завбільшки $\sim 100\text{—}500$ нм. Найвірогідніше, що частинки діоксиду кремнію утримувалися між собою завдяки залишку смолоподібних продуктів розкладу вуглецевої матриці.

Для визначення елементного складу золи провели її хімічний аналіз на поверхні мікроволока, а також загальний хімічний аналіз мікрОВОлокна та золи (табл. 2, 3).

Для порівняння проаналізували також вміст діоксиду кремнію в мікрОВОлокні карбонізованої гідратцелюлози без попереднього її просочування розчином СКД. В результаті вміст кремнію (у перерахунку на оксид) у золі аналізованого вуглецевого матеріалу стано-

Таблиця 2. Хімічний склад золи на поверхні ВВКМ

Складова золи	Вміст складової золи, ваг. %	Складова золи	Вміст складової золи, ваг. %
SiO ₂	93,80	Al ₂ O ₃	0,040
PbO	0,043	CaO	0,096
MgO	0,055	CuO	0,015
Fe ₂ O ₃	0,187	ZnO	0,159
Ni ₂ O ₃	0,069	MeO	0,665

Таблиця 3. Загальний елементний аналіз золи не просоченого СКД волокна і золи ВВКМ (100 % випал)

Зразок	Зола, ваг. %	SiO ₂ , ваг. %	Вміст домішок			
			PbO	MgO	Fe ₂ O ₃	
Волокно	2,8—4,0	2,7—3,6	0—28,9	9,0—41,7	5,1—104,1	
Зола	100,0	90—98	0—0,08	0,027—0,12	0,01—0,30	

вив 0,06—0,10 % загального вмісту домішок. Отже, основний внесок у зольність вуглецевих волокнистих матеріалів роблять продукти піролізу СКД, розчином якої просочували сировину перед карбонізацією.

Результати, наведені у табл. 2 і 3, показують, що зола на поверхні і в структурі мікроволокон ВВКМ на 90—98 ваг. % складається з діоксиду кремнію і практично не містить токсичних речовин.

Отже, до складу отриманої композиційної матриці ВВКМ входять два перспективні для медицини компоненти — вуглецеві волокна та діоксид кремнію.

Аналізуючи внесок кожного з цих компонентів ВВКМ у забезпечення ефективності перев'язувальних матеріалів, виготовлених на її основі, виокремили основні властивості кожного з них. Так, *вуглецева складова* ткани структури завдяки її хімічній та біологічній інертності здатна тривало забезпечувати сталі у часі механічні властивості (міцність на розрив, деформація в момент руйнування, еластичність), а також малу вагу, стійкість до впливу хімічних і біологічних реагентів; фізичні властивості (електропровідність, проникність повітря, гігроскопічність); унікальні структурні та високі сорбційні можливості щодо мікробів і ранового ексудату [1].

А властивості *кремнієвої складової* (SiO_2), встановлені дослідниками в кремнієвісних матеріалах для медицини, згубно впливають на патогенні мікроорганізми, зумовлюють зміну їх морфологічних властивостей, що сприяє активному загоюванню ран [4].

Крім перелічених вище властивостей композиційного матеріалу, вуглецева волокниста матриця в його основі:

- здатна механічно утримувати мікроби на поверхні матеріалу, що пригнічує їх ріст та розмноження і забезпечує у такий спосіб бактериостатичну активність матеріалу та слабо виражені бактерицидні властивості [13]. Отримані результати узгоджуються з даними вітчизняних вчених про те, що контакт мікроорганізмів з поверхнею вуглецевих волокон спричиняє деструкцію патогенних мікробних клітин і призводить до знищення життєздатних бактерій на поверхні створеного матеріалу [14];

- сприяє утворенню повноцінної клітинної системи рани під час її загоєння (присутні лімфоїдні елементи, макрофаги, лейкоцити, пізніше – фібробласти, фіброцити) і здійснює місцевий гомеостаз за рахунок короткодистанційних регуляторів мікрооточення [14]. Міжклітинним контактам відведено ключове значення в структурно-функціональній організації тканин під час фізіологічної, репаративної регенерації, і вони є визначальними в реакції тканин на контакт з вуглеволокнистим матеріалом.

Припустили, що кремнієва складова ВВКМ здійснює також істотний внесок у лікувальний процес, бо саме вона здатна активно пришвидшувати загоєння ран шляхом регуляції функцій ендотеліальних клітин, дермальних фібробластів, макрофагів та клітин

у мікроволокну ($\times 10^{-4}$) та золі, %						
	Ni_2O_3	Al_2O_3	CaO	CuO	ZnO	Σ_{4-11}
	8,0—91,5	2,1—30,9	9,6—114,1	0,4—12,0	16,1—112,1	54,2—538,5
	0,02—0,27	0,006—0,09	0,028—0,335	0,001—0,035	0,06—0,330	0,162—1,576

епідермісу [4]. Крім того, кремній (у вигляді SiO_2) підтримує ріст і утворення колагену в біологічних системах [5].

Що стосується ролі кремнієвої складової в проявах бактерицидності, то клітини бактерій здатні вступати у контактну взаємодію з високодисперсними матеріалами, зокрема SiO_2 , за рахунок протилежних електрокінетичних зарядів. Механізм цієї взаємодії зумовлений блокуванням частинками SiO_2 власного заряду бактерій [4, 9], що призводить до їх руйнування та проявів бактерицидного ефекту.

Отже, у розроблений нами ВВКМ лікувальні та бактерицидні властивості можуть забезпечуватися за рахунок наявності в структурі матеріалу агрегатів SiO_2 завбільшки $\sim 100\text{--}500$ нм, здатних і сприяти клітинній регенерації ранової поверхні, і знешкоджувати бактеріальні клітини.

Висновки. 1. Вперше виявлено, що в структурі і складі твердого залишку (коксу) вуглецевого мікрОВОлокна ВВКМ є поверхневий діоксид кремнію сферичної та голкоподібної форми, а також структурно зв'язаний приповерхневий прошарок з агрегатів SiO_2 неправильної форми, які разом утворюють вуглецеву волокнисту кремнієвмісну композиційну матрицю. Розроблений матеріал — це результат піролітичних перетворень гідратцелюлози у вуглецеве волокно під плівкою структуротвірної кремнієорганічної домішки з подальшою її деструкцією на фрагментарні частинки діоксиду кремнію під дією високих температур.

2. Встановлено, що парогазова активація ВВКМ призводить не тільки до підвищення її сорбційних характеристик, а й до візуалізації поверхневих та приповерхневих частинок діоксиду кремнію.

3. Запропонована технологія створення композиційної матриці відкриває перспективу для отримання в подальшому не тільки кремнієвмісних вуглецевих матеріалів, а ще й ряду структурно зв'язаних композицій з іншим функціональним призначенням.

4. Здатність ВВКМ забезпечувати сорбцію патогенних мікроорганізмів і їх знешкодження обґрунтовує правомірність її використання як антибактеріального матеріалу для виготовлення медичного текстилю для респіраторів, масок, ранових хірургічних та протиопікових пов'язок під час лікування гнійно-ускладнених бактеріальних уражень в умовах польової і стаціонарної хірургії.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Кононко І.В., Сергєєв В.П., Кліпов В.Д., Кононко Н.В. Огляд основних вимог до якості матеріалів медичного призначення для лікувально-профілактичних та військово-госпітальних потреб. Прикладні аспекти. *Вісн. НАН України*. 2022. № 9. С. 50—63. <https://doi.org/10.15407/visn2022.09.050>
2. Shen Z., Cai N., Xue Y., Chan V., Yu B., Wang J., Song H., Deng H., Yu F. Engineering sustainable antimicrobial release in silica-cellulose membrane with CaCO₃-aided processing for wound dressing application. *Polymers*. 2019. **11**, № 5. 808. <https://doi.org/10.3390/polym11050808>
3. Zulkiflee I., Masri S., Zawani M., Salleh A., Amirrah I.N., Wee M.F.M.R., Yusop S.M., Fauzi M.B. Silicon-based scaffold for wound healing skin regeneration applications: a concise review. *Polimers*. 2022. **14**, № 19. 4219. <https://doi.org/10.3390/polym14194219>
4. Fan C., Xu Q., Hao R., Wang C., Que Y., Chen Y., Yang C., Chang J. Multi-functional wound dressings based on silicate bioactive materials. *Biomaterials*. 2022. **287**. 121652. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2022.121652>
5. Öri F., Dietrich R., Ganz C., Dau M., Wolter D., Kasten A., Gerber T., Frerich B. Silicon-dioxide-polyvinylpyrrolidone as a wound dressing for skin defects in a murine model. *J. Cranio-Maxillofac. Surg.* 2017. **45**, Iss. 1. P. 99—107. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2016.10.002>
6. Mesa M., Becerra N.Y. Silica/protein and silica/polysaccharide interactions and their contributions to the functional properties of derived hybrid wound dressing hydrogels. *Int. J. Biomater.* 2021. 6857204. 13 p. <https://doi.org/10.1155/2021/6857204>
7. Мокиєнко А.В. Кремний в воде. Гигиенические и медико-биологические аспекты. Одесса: Фенікс, 2020. 206 с.
8. Медицинская химия и клиническое применение диоксида кремния: Чуйко А.А. (ред.). Киев: Наук.думка, 2003. 416 с.
9. Zare M., Ghomi E.R., Venkatraman P.D., Ramakrishna S. Silicone-based biomaterials for biomedical applications: Antimicrobial strategies and 3D printing technologies. *J. Appl. Polymer Sci.* 2021. **138**, Iss. 38. <https://doi.org/10.1002/app.50969>
10. Бандас І.А., Куліцька М.І., Ярошенко Т.Я., Корда М.М. Наночастинки діоксиду кремнію посилюють викиланий свинцем оксидативний та нітрооксидативний стрес. *Медична та клінічна хімія*. 2017. **19**, № 3. С. 48—53. <https://doi.org/10.11603/mcch.2410-681X.2017.v0.i3.8206>
11. Щербицька О.В., Гарбуз В.В., Кліпов В.Д., Сергєєв В.П., Кононко І.В., Клевцов В.М., Кононко Н.В. Дослідження процесів формування вуглецевих наноструктур при термодеструкції та карбонізації гідратцелюлозних волокон. Ч. II. Концентрація парамагнітних центрів і механічні властивості продуктів піролізу гідратцелюлозних волокон та ідентифікація вуглецевих нановолокон. *Наноструктурное материаловедение*. 2010. № 4. С. 39—44.
12. Щербицька О.В., Гарбуз В.В., Кліпов В.Д., Сергєєв В.П., Кононко І.В., Клевцов В.М., Лобунець Т.Ф., Уварова І.В. Дослідження процесів формування вуглецевих наноструктур при термодеструкції та карбонізації гідратцелюлозних волокон. Ч. I. Вивчення складу та фізико-хімічних властивостей газоподібних і твердих продуктів термодеструкції целюлози. *Наноструктурное материаловедение*. 2010. № 2. С. 24—31.
13. Кононко І.В., Бошицька Н.В., Сергєєв В.П., Кліпов В.Д., Кононко Н.В. Вуглецевий наноструктурний матеріал для багаторазових захисних масок. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2021. № 6. С. 78—86. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2021.06.078>
14. Ракша-Слюсарєва О.А., Пімоненко М.Ю., Слюсарєв О.А. Дослідження адсорбційних властивостей нового вуглецевого волокнистого сорбенту щодо патогенних мікроорганізмів у модельних експериментах. *Профілактична медицина*. 2015. № 1-2. С. 56—59. <https://doi.org/10.61948/prevmcd>

Надійшло до редакції 09.08.2024

REFERENCES

1. Kononko, I. V., Sergieiev, V. P., Klipov, V. D. & Kononko, N. V. (2022). Review of the basic requirements for the quality of medical materials. Applied aspects. *Visn. Nac. Acad. Nauk Ukr.*, No. 9, pp. 50-63 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/visn2022.09.050>
2. Shen, Z., Cai, N., Xue, Y., Chan, V., Yu, B., Wang, J., Song, H., Deng, H. & Yu, F. (2019). Engineering sustainable antimicrobial release in silica-cellulose membrane with CaCO_3 -aided processing for wound dressing application. *Polymers*, 11, No. 5, 808. <https://doi.org/10.3390/polym11050808>
3. Zulkiflee, I., Masri, S., Zawani, M., Salleh, A., Amirrah, I. N., Wee, M. F. M. R., Yusop, S. M. & Fauzi, M. B. (2022). Silicon-based scaffold for wound healing skin regeneration applications: a concise review. *Polimers*, 14, No. 19, 4219. <https://doi.org/10.3390/polym14194219>
4. Fan, C., Xu, Q., Hao, R., Wang, C., Que, Y., Chen, Y., Yang, C. & Chang, J. (2022). Multi-functional wound dressings based on silicate bioactive materials. *Biomaterials*, 287, 121652. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2022.121652>
5. Öri, F., Dietrich, R., Ganz, C., Dau, M., Wolter, D., Kasten, A., Gerber, T. & Frerich, B. (2017). Silicon-dioxide–polyvinylpyrrolidone as a wound dressing for skin defects in a murine model. *J. Cranio-Maxillofac. Surg.*, 45, Iss. 1, pp. 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2016.10.002>
6. Mesa, M. & Becerra, N. Y. (2021). Silica/protein and silica/polysaccharide interactions and their contributions to the functional properties of derived hybrid wound dressing hydrogels. *Int. J. Biomater.*, 6857204. <https://doi.org/10.1155/2021/6857204>
7. Mokienko, A. V. (2020). Silicon in water. Hygienic and medical-biological aspects. Odessa: Fenix (in Russian).
8. Chuyko, A. A. (Ed.). (2003). Medicinal chemistry and clinical application of silicon dioxide Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
9. Zare, M., Ghomi, E. R., Venkatraman, P. D. & Ramakrishna, S. (2021). Silicone-based biomaterials for biomedical applications: Antimicrobial strategies and 3D printing technologies. *J. Appl. Polymer Sci.*, 138, Iss. 38. <https://doi.org/10.1002/app.50969>
10. Bandas, I. A., Kulytska, M. I., Yaroshenko, T. Ya. & Korda, M. M. (2017). Silicone dioxide nano-particles enhance toxicity of lead on oxidative and nitro-oxidative stress. *Medychna ta klinichna khimiia*, 19, No. 3, pp. 48-53 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.11603/mcch.2410-681X.2017.v0.i3.8206>
11. Shcherbytska, O. V., Garbuz, V. V., Klipov, V. D., Sergeyev, V. P., Kononko, I. V., Klevtsov, V. M. & Kononko, N. V. (2010). Study of processes of formation of carbon nanostructures during thermal destruction and carbonization of hydrated cellulose fibers. Part II. Concentration of paramagnetic centers and mechanical properties of pyrolysis products of hydrocellulose fibers and identification of carbon nanofibers. *Nanostrukturnoe materialovedenie*, No. 4, pp. 39-44 (in Ukrainian).
12. Shcherbytska, O. V., Garbuz, V. V., Klipov, V. D., Sergeyev, V. P., Kononko, I. V., Klevtsov, V. M., Lobunets, T. F. & Uvarova, I. V. (2010). Study of processes of formation of carbon nanostructures during thermal destruction and carbonization of hydrated cellulose fibers. Part I. Study of the composition and physico-chemical properties of gaseous and solid products of the thermal destruction of cellulose. *Nanostrukturnoe materialovedenie*, No. 2, pp. 24-31 (in Ukrainian).
13. Kononko, I. V., Boshytska, N. V., Sergeev, V. P., Klipov, V. D. & Kononko, N. V. (2021). Carbon nanostructured material for multiple protective masks. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, No. 6, pp. 78-86 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/dopovidi2021.06.078>
14. Raksha-Slyusareva, O. A., Pimonenko, M. Yu. & Slyusarev, O. A. (2015). New carbon fiber sorbents adsorption properties to the pathogens mikroorganizm in model experiments. *Profilaktychna medytsyna*, No. 1-2, pp. 56-59 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.61948/prevmed>

Received 09.08.2024

V.D. Klipov, <https://orcid.org/0000-0002-5634-1512>

I.V. Kononko, <https://orcid.org/0000-0003-1976-7116>

N.V. Boshytska, <https://orcid.org/0000-0003-2241-1161>

V.P. Serhieiev, <https://orcid.org/0000-0001-9417-2548>

N.V. Kononko, <https://orsid.org/0000-0002-2069-0540>

Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

E-mail: nata25lia@gmail.com

CARBON SILICON-CONTAINING COMPOSITE MATRIX

FOR THE DEVELOPMENT OF ADVANCED BACTERICIDAL APPLICATION AGENTS IN SURGERY

The technology of obtaining carbon fiber composite matrix VVCCM with silicon dioxide content for medical purposes is developed and the algorithm of its production is described. The conditions of the main stages of the technological process of VVCCM manufacturing are established. The influence of structure-forming additive on the conditions of formation of sol and structurally bonded layer of silicon dioxide in the developed material has been investigated. The parameters of the porous structure were studied by the benzene vapor moisture absorption method. The microstructure of surface and near-surface layers containing silicon dioxide in the composite matrix samples was investigated using a scanning electron microscope Mira 3 LMU ("Tescan", Czech Republic), which made it possible to determine the location of the silicon dioxide layer in the composite structure, as well as its individual surface inclusions. The phenomenon of silicon dioxide aggregation into finely dispersed fiber-like structures after 100% combustion of carbon component in the process of ash formation at $T = 1073$ K has been found. The shape and size of silicon dioxide particles as well as their surface morphology were determined. Using the method of energy dispersive X-ray analysis and analytical chemistry methods to determine the chemical composition of composite matrix samples, it is proved that mineral inclusions on the surface of carbon fiber composite matrix microfibers are represented by silicon and silicon dioxide particles. The novelty of the developed technology lies in the discovery of an additional structural component in the composition of VVCKM, which allows us to refer it to a new class of carbon composite materials. In the composite matrix of VVCCM obtained by us, healing and bactericidal properties can be provided due to the presence of SiO_2 particles of ~ 100 — 500 nm in the structure of the material, which are able to promote cellular regeneration of the wound surface and destroy bacterial cells. This will allow to use VVKKM as bactericidal application agents in the treatment of purulent and complicated bacterial lesions both in the field and in hospital surgery.

Keywords: carbon fiber composite material, modification of carbon fiber composite matrix with silicon dioxide, biomedical properties.