doi: https://doi.org/10.15407/visn2026.10.017



СОЛОНІН
Юрій Михайлович —
академік НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України

1D-НАНОМАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ВУГЛЕЦЮ ТА ТУГОПЛАВКИХ СПОЛУК: ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ І ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ

Стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 16 вересня 2026 року

У доповіді наведено важливі результати проведених в Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України фундаментальних і прикладних досліджень у галузі наноматеріалознавства, зокрема щодо синтезу та вивчення властивостей одновимірних (1D) наноструктур на основі вуглецю і тугоплавких сполук. Відзначено актуальність і перспективність подальших робіт за цим напрямом, а також наголошено на можливості розширення сфери застосування 1D-наноматеріалів на основі вуглецю і тугоплавких сполук та створення з їх використанням нового покоління композитів на базі полімерів.

Шановний Анатолію Глібовичу!
Шановні члени Президії!
Дозвольте запропонувати до вашої уваги доповідь про особливості структури і перспективи використання одновимірних (1D) наноматеріалів на основі вуглецю і тугоплавких сполук. Як бачимо, в назві цих структур поєднуються два поняття: «тугоплавкі сполуки» і «наноматеріали».

Виокремити тугоплавкі сполуки в окрему специфічну групу матеріалів запропонував свого часу відомий вчений у галузі хімії й технології неорганічних матеріалів, засновник національної школи матеріалознавства тугоплавких сполук Григорій Валентинович Самсонов (1918—1975). Саме традиції цієї школи сприяли започаткуванню і розвитку в Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України досліджень, які поєднують класичну хімію тугоплавких сполук із передовими технологіями синтезу 1D-наноструктур на їх основі.

Отже, тугоплавкі сполуки — це широкий клас хімічних сполук, що характеризуються високою температурою плавлення (зазвичай вищою за 2500 °С), винятковою твердістю, зносостійкістю і хімічною інертністю. До них належать карбіди, бо-

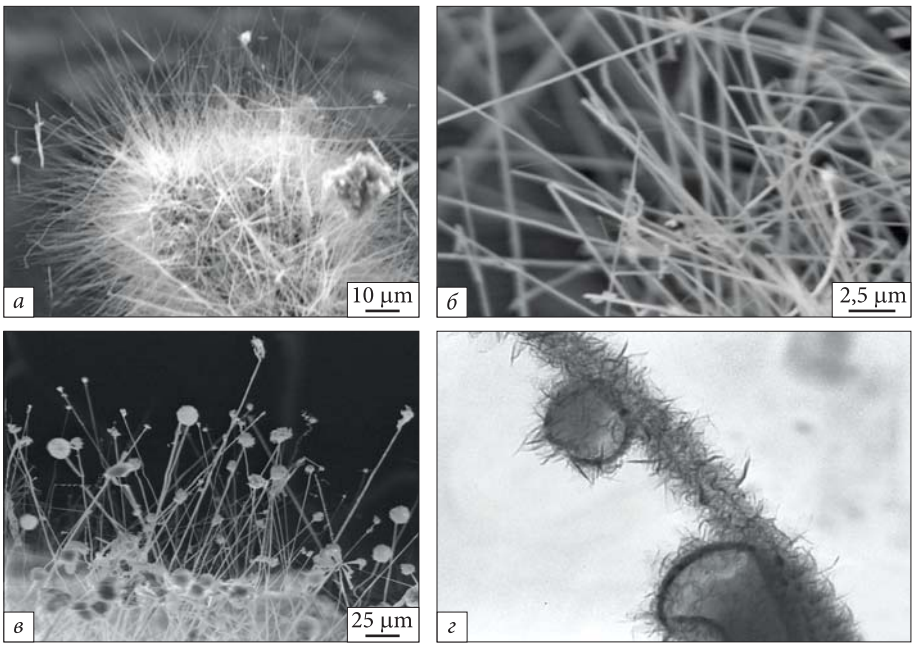


Рис. 1. 1D-форми тугоплавких сполук, синтезованих в Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України:
а — карбід титану (TiC);
б — карбід кремнію (SiC);
в — нітрид титану (TiN);
г — нітрид бору (BN)

риди, нітриди, силіциди, фосфіди та сульфіди перехідних металів, а також аналогічні сполуки бору та кремнію. Сфера використання тугоплавких сполук охоплює такі високотехнологічні галузі промисловості, як аерокосмічна техніка, ядерна енергетика, машинобудування, хімічні технології, мікроелектроніка, біомедицина тощо.

Подальше розширення перспектив використання тугоплавких сполук пов'язують з їх отриманням у наноструктурованому стані. Роботи за цим напрямом активно розвиваються в нашому інституті. Вони стосуються насамперед мікро- і нановолокон тугоплавких сполук, плівкових матеріалів на їх основі, нанопорошків і нанокристалічних масивних матеріалів тощо.

За традиційною класифікацією наноматеріали поділяють за кількістю просторових вимірів, які виходять за межі нанодіапазону (більші за 100 нм), на такі три групи:

• нульвимірні (0D) наноматеріали, електрони в яких обмежені в усіх трьох напрямках, що зумовлює унікальні оптичні та квантові властивості. Це квантові точки, фулерени, наночастинки металів, наноалмази;

• одновимірні (1D) наноматеріали, електрони в яких обмежені у двох напрямках, а в третьому (макроскопічному) можуть вільно рухатися. Це вуглецеві нанотрубки, нановіскери, нановолокна;

• двовимірні (2D) наноматеріали, в яких тільки один вимір (товщина) перебуває в нанодіапазоні, а два інші виміри є макроскопічними. Це графени, максени, тонкі плівки тощо.

У сьогоднішній доповіді буде розглянуто лише такі одновимірні наноформи, як нанотрубки і нановолокна. Для їх отримання ми використовували метод хімічного парофазного осадження, або CVD-метод (Chemical Vapor Deposition). Процес CVD полягає в розкладанні газоподібних речовин (прекурсорів) за високих температур у присутності нанорозмірних каталізаторів, що змушує матеріал кристалізуватися у вигляді видовжених ниток, трубок або дротів.

Порівнюючи механічні властивості (температуру плавлення, модуль Юнга, твердість, міцність на розтяг та на згин) деяких тугоплавких сполук у масивному стані з їхніми 1D-формами, можна констатувати, що всі вони характеризуються екстремально високими значеннями температури плавлення і модуля Юнга, але мікротвердість в одновимірних форм вища, а їхня міцність на розтяг більш

як на порядок перевищує цю величину для 3D-стану матеріалу (кераміки).

Отже, 1D-структури на основі вуглецю (нанотрубки) або тугоплавких сполук (карбідів, нітридів та боридів перехідних металів або кремнію), зберігаючи основні переваги своїх об'ємних аналогів, демонструють міцність на межі теоретичної. Ці властивості й зумовлюють їхню унікальність і дозволяють використовувати їх як армувальні та зміцнювальні добавки до композитів.

Крім того, одновимірні (1D) наноструктури на основі карбідів, нітридів та боридів кремнію і титану, а також нітриду бору (SiC, TiC, TiN, TiB_2, BN) належать до перспективних функціональних матеріалів. Завдяки спрямованому переносу носіїв заряду в них та екстремальній термохімічній стабільності ці 1D-форми тугоплавких сполук можна використовувати там, де звичайні кремнієві чи вуглецеві наноструктури не працюють. Потенційними сферами їх застосування є мікроелектроніка, альтернативна енергетика, оптоелектроніка, фотокаталіз та інші високотехнологічні галузі.

В останнє десятиліття науковці Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України синтезували мікро- та нановолокна, нанотрубки цілої серії тугоплавких сполук із використанням різних прекурсорів, каталізаторів та за різних умов проведення реакції (температури, швидкості потоку газової суміші тощо).

В результаті виконання комплексу фундаментальних і прикладних досліджень було вивчено морфологію отриманих продуктів, особливості кристалічної будови окремих волокон, розглянуто можливості їх практичного використання. У цих структурах спостерігається різний характер і різні форми масивів мікро- і нановолокон (рис. 1). Вони можуть утворювати структури у вигляді кущів, як це спостерігається у випадку карбіду і бориду титану (рис. 1*а*), у вигляді переплетеної повсті у випадку волокон карбіду і нітриду кремнію (рис. 1*б*). У випадку волокон нітриду титану на їхніх верхівках наявні частинки каталізатора, на поверхні яких і відбувається реакція перетворення молекул газової суміші на кристалічний нітрид (рис. 1*в*). Цікаві структури утворює графітоподібний нітрид бору (рис. 1*г*). У цьому випадку перпендикулярно до поверхні нанотрубок і наносфер, що виникли на ранній стадії процесу, виростають графеноподібні пластинки, утворюючи пухнасті волокна, подібні до вовняних. Завдяки такій структурі цей матеріал має унікальну селективну сорбційну здатність.

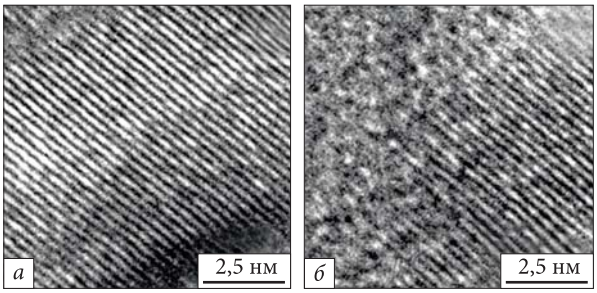
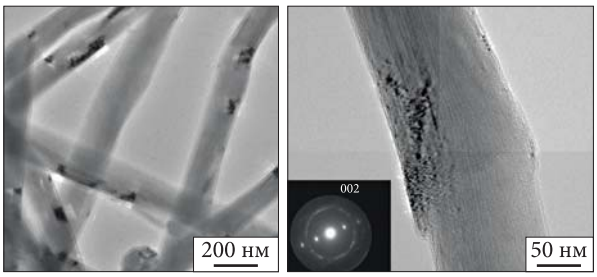


Рис. 2. Пряме зображення структури нановолокон карбіду кремнію в центрі волокна (*а*) і на межі з аморфним шаром (*б*); проєкція площини типу {111}

Тепер розглянемо особливості структури окремих поодиноких нановолокон карбіду кремнію. Відомо, що SiC має схильність до політипізму. За даними Х-променевого аналізу, для отриманих нановолокон карбіду кремнію характерна кубічна структура 3C–SiC з домішками фаз 6H- і 4H-політипів. На поверхні волокон, особливо за присутності кисню, може утворюватися аморфний шар. Пряме зображення структури у вигляді проєкції площин типу {111} в центрі волокна та на межі з аморфним шаром наведено на рис. 2. Загалом спостерігаються два типи нановолокон: майже циліндричні і з трикутним перерізом. Перші містять значну кількість двійників, а другі — політипи і дефекти упаковки по площинах типу {111}.

Як уже було згадано, вуглецеві нанотрубки мають рекордні величини таких показників, як модуль Юнга (порядку 1 ТПа) і міцність на розтяг (σ_p = 130 ГПа). Однак це стосується переважно одностінних нанотрубок. У багатостінних нанотрубках може бути певна кількість дефектів, що призводить до зниження обох



а *б*

Рис. 3. ТЕМ-зображення багатостінних вуглецевих нанотрубок з дефектами (*а*) і збільшене зображення одного з дефектів (*б*)

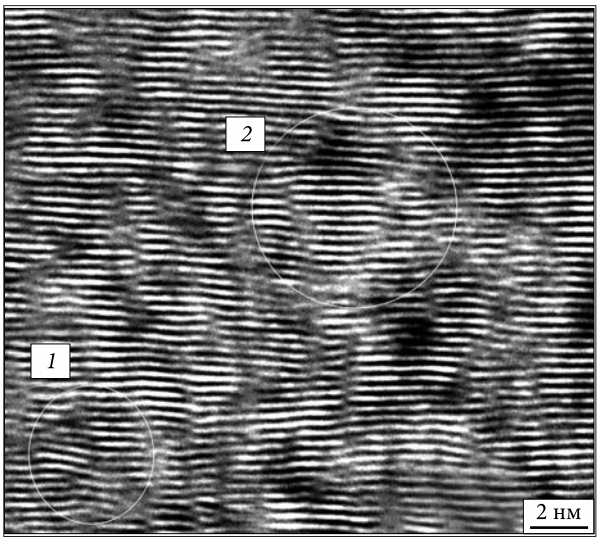


Рис. 4. Пряме зображення структури багатостінної вуглецевої нанотрубки в центральній частині дефекту

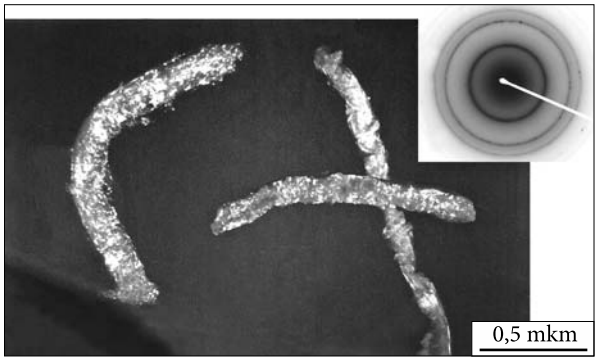


Рис. 5. Полікристалічні алмазні нановолокна, отримані високотемпературним ударним стиском багатостінних вуглецевих нанотрубок (25—35 ГПа, 3000—3500 К)

цих характеристик. Дійсно, на отриманих нами електронних мікрофотографіях багатостінних нанотрубок діаметром 100—200 нм спостерігається багато дефектів у вигляді темних ділянок на бокових поверхнях (рис. 3). При цьому модуль Юнга зменшувався до 0,45 ТПа, міцність на розтяг — до 40 ГПа.

Щоб з'ясувати, чим спричинений такий контраст і що являють собою ці дефекти, структуру багатостінних нанотрубок було досліджено методом електронної мікроскопії високої роздільної здатності безпосередньо в зоні дефекту (рис. 4). Ми побачили, що в зоні дефекту порушене ідеальне розташування графенових шарів (0001), що утворюють стінку нанотрубки. Натомість спостерігається значна кількість спотворень у вигляді окремих дислокацій та їх скупчень, які разом утворюють характерну блокову структуру. Це переважно призматичні крайові дислокації з вектором Бюргерса, орієнтованим перпендикулярно до базисних площин. Крім того, ми виявили два типи дислокацій: перший — коли край зайвої площини вільний, і другий — коли він приєднаний до сусіднього шару. Якщо в самому графеновому шарі атоми вуглецю зв'язані за рахунок sp^2-гібридизації, то локально в місці приєднання це буде вже sp^3-гібридизація, як в алмазі. В принципі ці ділянки можуть слугувати зародками, наприклад, у разі можливого перетворення графітоподібної стінки нанотрубки на алмаз.

Ми справді спостерігали перетворення багатостінних вуглецевих нанотрубок на полікристалічні алмазні волокна в разі їх обробки високотемпературним ударним стиском. Полікристалічні волокна алмазу успадковують морфологію нанотрубок і складаються з окремих спечених алмазних зерен розміром близько 5 нм (рис. 5).

Прямі зображення структури, отримані з різних ділянок багатостінної вуглецевої нанотрубки, свідчать про різний ступінь розупорядкування графенових шарів, що утворюють її стінки, — від їх ідеального розташування в більшій частині нанотрубки до значного розупорядкування внаслідок наявності дислокацій

біля розглянутих вище дефектів і нарешті до майже аморфного стану в деяких приповерхневих ділянках.

Запропоновано метод кількісної оцінки ступеня розупорядкованості структур у термінах щільності дислокацій з використанням аналізу фур'є-перетворень зображень, отриманих методом електронної мікроскопії високої роздільної здатності. Щільність дислокацій для розупорядкованих ділянок оцінюють у межах $3{,}3\acute{3}\cdot10^{13}$—$1\cdot10^{14}$/см^2.

Особливості структури так званих мезостінних вуглецевих нанотрубок, стінки яких складаються з 20—30 концентричних графенових шарів, полягають насамперед у тому, що вони не є правильними циліндрами — вони сильно покручені, мають дефекти у вигляді бамбукоподібних ділянок, можуть містити залишки каталізатора. Крім того, в них спостерігаються внутрішні перетинки і характерна хвилеподібна деформація стінок. Такі нанотрубки дуже складно рівномірно розподілити, наприклад, у полімерній матриці, тому в подальшому для створення композитів ми використовували розглянуті вище багатостінні вуглецеві нанотрубки.

Отже, за результатами аналізу структури багатостінних вуглецевих нанотрубок було визначено найбільш перспективні з них для введення в полімерну матрицю. Крім того, синтезовані нами нановолокна карбіду кремнію використано для створення композитів на основі фторопласту триботехнічного призначення. Показано, що добавки багатостінних вуглецевих нанотрубок та/або нановолокон SiC зменшують зношування чистого фторопласту на два порядки, а фторопласту, наповненого колоїдним графітом, — у 3—8 разів, залежно від навантаження.

З використанням градієнтних матеріалів типу «металева підкладка — шар нанокомпозиту на основі фторопласту» було створено серії різних пласких і циліндричних підшипників ковзання для роботи без змащування (рис. 6). Ці роботи проводили в інтересах таких підприємств, як АТ «Перший київський машинобудівний завод» та АТ «Антонов».

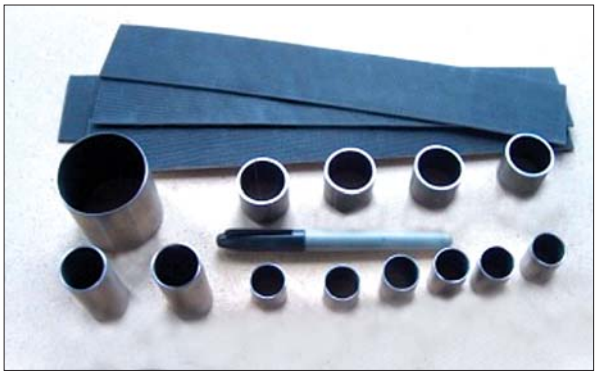


Рис. 6. Металфторопластова стрічка та підшипники ковзання у вигляді втулок із покриттям з нанокомпозиту на основі фторопласту



Рис. 7. Фільтри рулонного типу на основі пінонікелю, наповненого нановолокнами карбіду кремнію

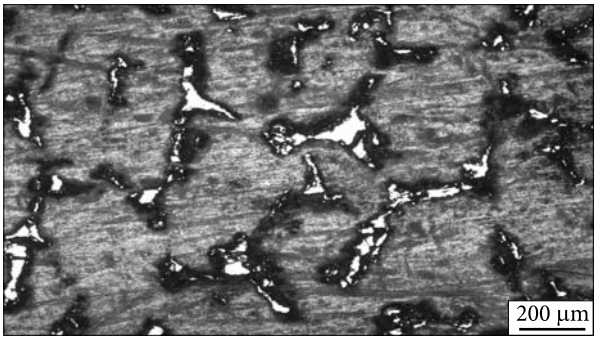


Рис. 8. Композит з дуплексною структурою «фторопласт + Ni + нановолокна SiC»

У співпраці з Національним університетом охорони здоров'я України імені П.Л. Шупика розроблено і досліджено біосумісність композитів на основі пластмаси «Фторакс» з добавками багатостінних вуглецевих нанотрубок і нановолокон карбіду кремнію для поліпшення механічних властивостей. Цей композит реко-

мендовано для використання у стоматологічній практиці.

Ще один напрям наших досліджень — створення так званих просторово розподілених наноструктур. Ми отримували їх осадженням нановолокон тугоплавких сполук на внутрішній поверхні різних високопористих матриць, таких як стільникові структури з кордієриту, піноніkель, вуглецева або кремнеземна тканини.

Сфера застосування таких просторово розподілених наноструктур досить широка. Насамперед їх використовують у фільтрах тонкого очищення газів і рідин. У нашому інституті розроблено технологію виготовлення фільтрів рулонного типу на основі системи «піноніkель — нановолокна карбіду кремнію» (рис. 7). Крім високої фільтрувальної здатності ці вироби мають підвищену термо- і корозійну стійкість, до того ж потенційно є можливість регенерації відпрацьованих фільтрів.

Ще один цікавий напрям пов'язаний зі створенням так званих аерогелів. Це ультралегкі тверді матеріали з високою кінцевою міцністю. Рекордсменом з легкості вважають аерогель на основі графену з питомою вагою 0,16 мг/см^3. Аерогелі можна використовувати як термоізолятори, сорбенти, суперконденсатори, а також для звукоізоляції. Найбільш поширеними є аерогелі на основі кремнезему.

Ми розробили новий аероегль на основі нановолокон карбіду кремнію шляхом його нанесення на вуглецеву тканину з подальшим її випалюванням на повітрі за температури 750 °С. Просторово розподілену наноструктуру «піноніkель — нановолокна карбіду кремнію» було використано як прекурсор для створення композиту на основі фторопласту з дуплексною структурою (рис. 8). Цей матеріал продемонстрував істотно вищі механічні характеристики порівняно з чистим фторопластом.

На завершення варто зазначити, що більшість наших розробок, пов'язаних з одновимірними формами тугоплавких сполук, захищено патентами України.

Дякую за увагу!

За матеріалами засідання підготувала О.О. Мележик

Yuriy M. Solonin
I.M. Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

1D NANOMATERIALS BASED ON CARBON AND REFRACTORY COMPOUNDS:
STRUCTURAL FEATURES AND APPLICATION PROSPECTS

Transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, September 16, 2026

The report presents important results of fundamental and applied research in the field of nanomaterials science conducted at the I.M. Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine, in particular on the synthesis and study of the properties of one-dimensional (1D) nanostructures based on carbon and refractory compounds. The relevance and potential of further work in this area are noted, and the possibility of expanding the field of application of 1D nanomaterials based on carbon and refractory compounds and creating a new generation of polymer-based composites using them is emphasized.

Cite this article: Solonin Yu.M. 1D nanomaterials based on carbon and refractory compounds: structural features and application prospects (transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, September 16, 2026). *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr*. 2026. (10): 17—22. https://doi.org/10.15407/visn2026.10.017