

10.31653/smf48.2024.54-62

Корх М.В.

Національний університет “Одеська морська академія”

ВЛАСТИВОСТІ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОТРУБОК ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ РЕСУРСУ СУДНА ТА ЙОГО ОБЛАДНАННЯ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Морська галузь завжди була в центрі інновацій та технологічних вдосконалень. Одним із ключових напрямків, які в останні роки знаходять широке застосування, є використання нанотехнологій. Нанотехнології вносять революційні зміни у різні аспекти морського господарства, включаючи суднобудування, експлуатацію механізмів та приладів, охорону довкілля та дослідження океану. Однією з ключових галузей, які виграють від нанотехнологій, є суднобудування. Використання наноматеріалів, таких як вуглецеві нанотрубки, полімерні нанокompозити та нанокераміка, дозволяє створювати легкі, але дуже міцні конструкції. Це сприяє покращенню ефективності плавання, зменшенню ваги суден та збільшенню їхньої морської стійкості [1].

Впровадження нанотехнологій у приладах та механізмах машинного відділення морського судна має величезний потенціал для поліпшення його продуктивності, надійності та збільшення ресурсу машин і механізмів. Використання нанотехнологій у сучасних засобах обладнання морських судів відкриває нові можливості для підвищення ефективності операцій, забезпечення комфорту екіпажу та зменшення впливу на навколишнє середовище.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У світовому науковому середовищі зараз проводяться інтенсивні дослідження в напрямках удосконалення існуючих й створення новітніх «проривних» нанотехнологій.

Аналіз наукових публікацій зарубіжних вчених свідчить, зокрема, про те, що саме нанотехнології мають велику перспективу використання при виготовленні різноманітних високоміцних та корозійностійких корпусних і конструктивних елементів на основі вуглецевих нанотрубок, що викликає підвищений інтерес серед представників суднобудівного напрямку.

Постановка завдання. При експлуатації судових механізмів виникають деякі проблеми, які вимагають ефективного вирішення. Завданням даної статті є аналіз наукових засад та передумов що до

отримання та застосування вуглецевих нанотрубок для збільшення ресурсу судна та його обладнання.

Виклад основного матеріалу. Однією з найважливіших подій в історії розвитку нанотехнології стало відкриття у 1991 р. нової форми нановуглецю – нанотрубок. Загальновідомим є факт спостереження структури багат шарових нанотрубок Іджімою в 1991 р..

Вуглецеві нанотрубки (ВНТ) – це протяжні згорнуті графітові площини, мають циліндричну форму. Як правило, товщина їх досягає декількох десятків нанометрів, з довжиною в кілька сантиметрів. На кінці нанотрубок утворюється сферична головка, яка є однією з частин фулерену [1]. Існують такі типи вуглецевих нанотрубок: металеві та напівпровідникові. Головним їх відмінністю є провідність струму. Перший вид може проводити струм при температурі рівній 0°C, а другий – тільки при підвищених температурах.

Структурні властивості вуглецевих нанотрубок. *Одношарові вуглецеві нанотрубки (ОВНТ)* – це безшовні циліндри графену, що закінчуються фулереноподібною півсферою. Відмінними рисами ОВНТ є простота їх будови, менша кількість дефектів і, як наслідок, високі механічні і фізико-технічні характеристики [2]. Разом із тим необхідно зазначити, що практичне застосування цих наноструктур обмежується електронікою і приладобудуванням, де потрібна порівняно невелика кількість вуглецевих нанотрубок високої якості. Отримані нанотрубки майже завжди є кривими і переплутаними одна з одною, формуючи при цьому по-різному заплутані клубки (рис.1).



Рис.1. Електронно – мікроскопічне зображення ВНТ (а) та їх «ліс нанотрубок» (б, в) [2]

Ідеальна ВНТ являє собою згорнуту в циліндр графітову площину з півсферами по краях (рис. 2 а). Графітова сітка складається із гексагональних комірок (на бічній поверхні циліндра і його півсферах) і пентагональних комірок, що знаходяться по краям у напів

сфер. Діаметр і довжина ВНТ коливаються в межах 0,3 – 5 нм та 1-500 мкм відповідно [2].

У залежності від хіральності в них можуть проявлятися металеві або напівпровідникові властивості. Термін *хіральність* означає, що два предмети знаходяться у відповідності один до одного як ліва і права руки, тобто являють собою дзеркальне зображення, які не збігаються при спробі їх суміщення у просторі. Хіральними можуть бути кристалічні структури (двоокис кремнію – природний кварц (рис. 2 б) .

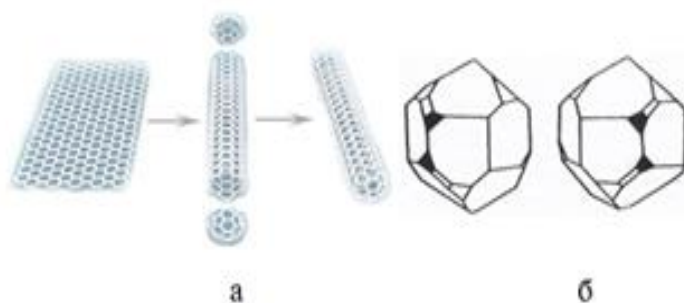


Рис. 2. Схематичне формування закритої нанотрубки (а) та зображення правого та лівого кристалу кварцу (б) [6]

Багатошарові вуглецеві нанотрубки (БВНТ) відрізняються від одношарових більш широкою різноманітністю форм і конфігурацій, які проявляються як у поздовжньому, так і в поперечному напрямку. БВНТ, як правило, складаються з одношарових нанотрубок діаметром, що поступово зростає, розміщених у вигляді концентричних циліндрів, та містять у собі від декількох до десятків ОВНТ, усталених коаксіально одна в одну [6]. За своєю структурою їх поділяють на БВНТ типу «матрьошка», шестикутна призма, сукупність вкладених один в одного коаксіальних призм та типу «згорток» (рис. 3) [2].

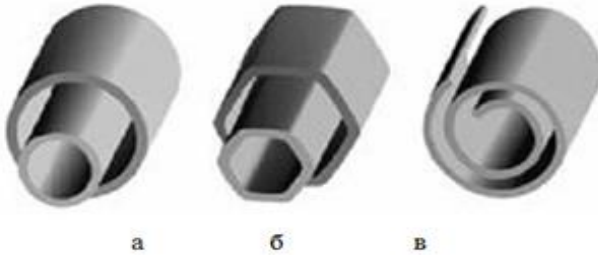


Рис. 3. Поперечний переріз БВНТ: а – матрешка, б – шестикутна призма, в – згорток [1]

Отримання вуглецевих нанотрубок. На сьогоднішній день існують наступні методи одержання вуглецевих нанотрубок: електродуговим розрядом, лазерне випаровування, метод осадження парів [1].

Електродуговий розряд. Отримання вуглецевих нанотрубок у плазмі електричного заряду, який горить із застосуванням гелію. Такий процес може виконуватися за допомогою спеціального технічного обладнання для отримання фулеренів. Але при даному способі використовуються інші режими горіння дуги. Наприклад, щільність струму знижується, а також використовують катода величезних товщин. Для створення атмосфери з гелію необхідно підвищити тиск цього хімічного елемента. Вуглецеві нанотрубки отримуються методом розпилення. Щоб їх кількість збільшилася, необхідно ввести в графітовий стрижень каталізатор. Найчастіше це суміш різних груп металу. Далі, відбувається зміна тиску і способу розпилення. Таким чином, виходить катодний осад, де і утворюються вуглецеві нанотрубки. Готові вироби ростуть перпендикулярно від катода і збираються в пучки. Вони мають довжину 40 мкм.

Лазерне випаровування. Такий спосіб був винайдений Річардом Смали. Суть його полягає в тому, щоб випаровувати різні графітові поверхні в реакторі, що працює при високих температурах. Вуглецеві нанотрубки утворюються в результаті випаровування графіту на нижній частині реактора. Беруть довгу кварцову трубку, в якій поміщають графітову мішень, а за графітовою мішенню розміщують майданчик, що охолоджується. Трубку розміщують у грубці, яку нагрівають до 1000 градусів. Графітову мету опромінюють лазерним променем діаметром близько півтора мм. При опроміненні частинки графіту відносяться з поверхні мішені на майданчик. Серед наноча-

стинок графіту, що опинилися на майданчику, виявляються фулерени та нанотрубки.

Осадження з газової фази. Метод осадження парів вуглецю був винайдений в кінці 50-х років. Але ніхто навіть і не припускав, що за допомогою нього можна отримувати вуглецеві нанотрубки. Отже, для початку необхідно підготувати поверхню з каталізатором. В якості нього можуть служити дрібні частинки різних металів, наприклад, кобальту, нікелю і багатьох інших. Нанотрубки починають з'являтися з шару каталізатора. Їх товщина безпосередньо залежить від розміру каталізу металу. Поверхня нагрівається до високих температур, а потім відбувається підведення газу, що містить вуглець. Серед них - метан, ацетилен, етанол і т. п., в якості додаткового технічного газу служить аміак. Даний спосіб отримання нанотрубок є найпоширенішим. Сам процес відбувається на різних промислових підприємствах, завдяки чому витрачається менше коштів для виготовлення великої кількості трубок. Ще однією перевагою такого методу є те, що вертикальні елементи можуть вийти з будь-яких частинок металу.

Властивості вуглецевих нанотрубок.

Завдяки особливостям своєї будови (високій міцності зв'язку, високій щільності упаковки атомів, відсутності чи малій щільності дефектів структури) нанотрубки мають унікальні фізико-хімічні, механічні властивості. Збільшення різноманітності незвичайних властивостей нанотрубок і широкі перспективи утворення на їх основі функціональних і конструкційних матеріалів відкриває модифікування вуглецевих нанотрубок. Такі незвичайні властивості передбачають широке практичне застосування нанотрубок – як самостійного матеріалу (мікроелектроніка, біологія та медицина), і як елементарного об'єкту нанотехнологій при утворенні покриттів, композиційних матеріалів граничної міцності (суднобудування, будівництво, машинобудування).

Застосування вуглецевих нанотрубок для збільшення ресурсу судна та його обладнання. Застосування композитних матеріалів є перспективним напрямом у суднобудуванні — особливо під час створення високошвидкісних, пасажирських та рибальських суден. Головні якості композитів: зносостійкість та стійкість до дії агресивних середовищ. Мала щільність дозволяє виготовляти легкі конструкції. Це підвищує безпеку та економічність судів. Заміна сталевих корпусу судна на нові види покриттів з використанням кон-

струкційних матеріалів, призведе до підвищення ресурсу корпусу судна, зменшення експлуатаційних витрат. Такі матеріали мають меншу вагу та більшу міцність, що вплине на збільшення морських якостей [3].

Ще одне цікаве практичне застосування нанотрубок – вогнезахисні покриття на морських судах. ВНТ можуть бути використані замість звичайних галогеновмісних антипиренів (в істотно менших кількостях) для підвищення термостійкості полімерів і теплових бар'єрних шарів на їхній основі.

Морські покриття корпусу, такі як фарби проти обростання, позитивно вплинули на збільшення ресурсу судна, але приводили до забруднення довкілля, оскільки до їх складу входили отруйні хімічні сполуки. Протягом останнього десятиліття нанотехнології викликали значний інтерес до застосування, у тому числі у морській галузі.

В даний час покриття на основі ВНТ активно використовуються в якості необростаючих і антикорозійних судових покриттів. На основі вуглецевої нанотрубки (ВНТ) були створені багатошарові силіконові покриття. ВНТ зазвичай завантажують у полімерну матрицю, а отриманий матеріал використовують для нанесення на захисні покриття. ВНТ мають високу міцність на розрив і модуль Юнга, в порівнянні зі сталлю. Зміцнення матриці фарби ВНТ покращує механічні властивості покриттів, значне покращення ударостійкості [4].

Норвезька компанія Advanced Marine Coatings, що спеціалізується на розробці покриттів для морських судів, представила нове покриття, у складі якого вперше використані вуглецеві нанотрубки Baytubes®. У результаті підвищився опір абразивному зношуванню, зменшився гідравлічний опір між корпусом судна й водою, що привело до істотного зниження витрати палива. Нове покриття «Green Ocean Coating Heavy Duty», основу якого становить двокомпонентна епоксидна смола, має високу водонепроникність й особливо підходить для захисту корпусу судна нижче поверхні води. Покриття можуть застосовуватися як для нових судів, так і для відновлення старих або поточного ремонту. Ще одна перевага – завдяки гладкості й твердості нового покриття можна не застосовувати спеціальні засоби, що охороняють судна від біологічного обростання. Таким чином, нанотрубки дозволили розроблювачам знайти найбільш економічне й найбільше екологічне рішення.

Протикорозійні покриття суден льодового плавання повинні протистояти абразивній дії льоду, що залежить від шорсткості корпусу, характеристик льоду, швидкості руху, тиску, температури, вологості, наявності снігу. Цим вимогам задовольняє покриття "Інерта 160". При використанні покриття витрата палива під час льоду знижується до 18 %, на чистій воді - до 6%. Міцність покриття з такої сталі зростає в 3 - 4 рази, твердість – на порядок, крім того багаторазово збільшується корозійна стійкість.

Нанотрубки також використовують при розробці нових мастил і охолоджуючих сумішей для підвищення ресурсу механічних вузлів тертя морських транспортних систем [5]. Присадки до мастильних матеріалів знайшли широке застосування при експлуатації суднового обладнання з метою збільшення їх ресурсу. Перехід від присадок мікронних розмірів до нанорозмірних широко починає впроваджуватися у техніці.

Використання нанодобавок в мастильних матеріалах розглядається як один з найбільш ефективних методів поліпшення трибологічних характеристик, що знижують тертя і знос. Таке трибологічне вдосконалення значно посилює енергозбереження, скорочення викидів, тим самим знижуючи вплив на навколишнє середовище [6]. Оксидні наночастинки, такі як Al_2O_3 , CuO або ZnO , широко використовуються як наночастинки, що поліпшують трибологічні показники мастильних матеріалів. Інші добавки включають беззольні добавки, іонні рідини, ефіри боратів, неорганічні наноматеріали, наноструктури вуглецевого походження, такі як вуглецеві нанотрубки (CNTs), графіт і графен. Специфічні добавки використовуються з метою поліпшення специфічних властивостей мастильних масел [7].

В результаті самоорганізації при взаємодії наноприсадок з поверхнями деталей відбувається утворення пакувальної плівки, що має високу контактну міцність і пластичність, гарну теплопровідність, при низьких швидкостях збільшує фактичну площу контакту, знижує коефіцієнт тертя й зношування, захищає поверхні від схоплювання. Найважливішим показником дії наноприсадок є здатність створювати на поверхні контакту деталей тонку захисну плівку, що запобігає руйнуванню робочих поверхонь [8].

Крім збільшення ресурсу пар тертя при використанні присадок, спостерігається надзвичайно важливий ефект відновлення пошкоджень. Присадка формує захисне покриття на металевих деталях тертя

механізмів безпосередньо в процесі їх експлуатації. Особливість процесу – зміцнення покриття з одночасним його зростанням.

ВНТ застосовують у виробництві різних суднових електротехнічних пристроях [9]. Завдяки властивостям нанотрубок та за рахунок своєї легкості і підвищеної провідності кабель, виготовлений з використанням вуглецевих нанотрубок, істотно перевершуватиме свого мідного попередника, що робить його промислове виробництво більш вигідним.

Впровадження наноматеріалів у будівельні матеріали суден дозволяє зменшити вагу судна та покращити його гідродинамічні властивості, що впливає на економію палива та зниження викидів.

Висновки і перспективи подальших досліджень. За результатами досліджень визначимо наступне.

1. Дослідження вуглецевих нанотрубок становлять значний фундаментальний та прикладний інтерес для морської індустрії. Фундаментальний інтерес до цього об'єкта обумовлений, насамперед, його незвичайною структурою та широким діапазоном зміни фізико-хімічних властивостей залежно від хіральності. Багато з цих властивостей ще й сьогодні є предметом інтенсивних досліджень, спрямованих на виявлення нових цікавих особливостей поведінки нанотрубок у тій чи іншій ситуації.

2. Вуглецеві нанотрубки грають важливу роль в інноваційних технологіях. Багато фахівців прогнозують зростання даної галузі в найближчі роки. Буде спостерігатися значне зростання виробничих можливостей, що забезпечить істотні зміни в морських галузях, машинобудуванні, оптоелектроніці, мікроелектроніці, а також медицині та екології. Це призведе до зниження вартості на ВНТ та буде впливати на величезний попит користування. Вуглецеві нанотрубки стануть незамінним матеріалом для багатьох пристроїв і обладнання. Важливо продовжувати дослідження та розробки в цій області для досягнення максимальних переваг цих інновацій.

Перелік використаних джерел

1. Куцова В.З. Вуглецеві наноматеріали: навч. посібник/ В.З. Куцова, Т.В. Котова // Дніпропетровськ: НМетАУ. – 2014. – 61 с.
2. Савченко І. О. Нанохімія та нанотехнології: підручник / І. О. Савченко // Київ. нац. ун-т ім. Тараса Шевченка. – 2019. - 447 с.
3. Корх М.В. Застосування супергідрофобних наноматеріалів і покриттів у морській галузі / М.В. Корх // Матеріали міжнародної

науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт». – Одеса: НУ «ОМА». 18.03.2021 – 19.03.2021. – С. 54-58.

4. Козицький С. В., Кіріян С. В. Застосування наночастинок для збільшення ефективності суднових механізмів / С. В. Козицький, С. В., Кіріян // Суднові енергетичні установки: Науково-технічний збірник. Вип. 46. - Одеса: НУ «ОМА» . – 2022.- С. 53-66.

5. Козицький С. В. Властивості наноструктурованих матеріалів / С. В. Козицький, С. В. Кіріян // Суднові енергетичні установки: Науково-технічний збірник. Вип. 45. - Одеса: НУ «ОМА» . – 2022.- С. 75 – 86.

6. Агеєв М.С. Застосування комбінованих технологій відновлення для підвищення ресурсу деталей засобів транспорту / М.С. Агеєв, І.Грицук // Збірник наукових праць Укр. державного університету залізничного транспорту. - 2020. – С. 81 – 92.

7. Гузько І. І. Застосування нанотехнології для підвищення довговічності суднових допоміжних механізмів / І. І. Гузько, Е.О. Димитрашко // Матеріали науково-технічної конференції молодих дослідників "Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт"». – Одеса: НУ «ОМА». 16.11.2022. – С. 239-241.

8. Kozytzkyi S.V., Kiriian S.V. Properties and behavior of nanoparticles / S.V. Kozytzkyi, S.V. Kiriian // Фізика аеродисперсних систем. № 60. – 2022. – С.17-30. DOI: 10.18524/0367-1631.2022.60.265983.

9. Корх М.В. Застосування вуглецевих нанотрубок в електротехніці суднового обладнання / М.В. Корх // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт». – Одеса: НУ «ОМА». 19.03.2022. – С. 50-53.