

МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (131, 132, 133)

УДК 621.891

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ З ОТРИМАННЯ НАНОЧАСТИНОК ВУГЛЕЦЮ
ТА ЇХНЬОГО ЗАСТОСУВАННЯ В ТРИБОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ

Доктори техн. наук С. В. Воронін, М. П. Ремарчук,
кандидати техн. наук О. О. Суранов, О. В. Суранов, А. О. Бабенко

ANALYSIS OF RESEARCH ON THE PRODUCTION OF CARBON NANOPARTICLES
AND THEIR APPLICATION IN TRIBOLOGY SYSTEMS

Dr. Sc. (Tech.) S. V. Voronin, Dr. Sc. (Tech.) M. P. Remarchuk, PhD (Tech.) O. O. Suranov,
PhD (Tech.) O. V. Suranov, PhD (Tech.) A. O. Babenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296617>



Анотація. У статті проведено аналіз досліджень отримання наночастинок вуглецю та їхнього застосування в трибологічних системах, методів і пристроїв для отримання, досліджень з вивчення впливу наночастинок вуглецю на мастильну плівку, надано розрахункову схему взаємодії наночастинок вуглецю з металевою поверхнею в парі тертя, розрахункову модель зміни часу адсорбції наночастинок вуглецю залежно від радіуса до початкової відстані.

Ключові слова: наночастинок вуглецю, концентрація вуглецевої сажі, мастильна здатність, тертя, інтенсивність зношування.

Abstract. The article analyzes research on the production of carbon nanoparticles and their use in tribological systems. A comparison of the results of installations based on different methods of obtaining nanotubes and fullerenes shows that the purest and highest-quality product is obtained by laser evaporation of graphite, but this is a long, time-consuming and expensive process. The yield of useful products is up to 20 %. The thermal method has its advantages and disadvantages. The advantages include the availability and cheapness of carbon raw materials: from oil, carbon gases to municipal waste. All of them are sources of nanotubes and fullerenes when using the thermal method. The yield of useful nanoproductions is average, and the purity reaches 90-95 %.

The simplest known method is the electric arc method for obtaining nanotubes and fullerenes. However, the yield of useful products does not exceed 15%. In addition, the large number of reactor designs for obtaining highly structured carbon nanoparticles indicates that an acceptable design has not yet been found that would guarantee obtaining a product with specified properties, stable parameters and in the required quantities.

The article also analyzes research on the effect of carbon nanoparticles on the lubricating film, provides a calculation scheme for the interaction of a carbon nanoparticle with a metal surface in a friction pair, and provides a calculation model for the change in the adsorption time of carbon nanoparticles depending on the radius to the initial distance. Which showed that according to the experimental data of other researchers, the data obtained regarding the time of physical adsorption of individual molecules and their aggregates is about 10^{-9} to 10^{-6} seconds, which confirms the priority of the formation of the solvate shell, and only then the manifestation of the adsorption of carbon nanoparticles.

The analysis of studies on the influence of carbon nanoparticles showed that there is a dependence for determining the intensity of wear of sliding friction pairs in elastic contact, which takes into account the concentration of carbon nanoparticles in the oil and the contact pressure. According to the obtained dependence, the intensity of wear is inversely proportional to the concentration of carbon nanoparticles, and directly proportional to the contact pressure.

Keywords: carbon nanoparticles, carbon black concentration, lubricity, friction, wear intensity.

Вступ. Способи та пристрої виробництва для отримання наночастинок вуглецю (НЧВ), відомі на сьогодні, не дають змогу виробляти їх у достатній для досліджень і застосування кількості, крім того, НЧВ мають високу собівартість у виробництві. Тому розроблення нових способів і пристроїв є актуальним завданням.

Незважаючи на унікальні властивості НЧВ, вони не набули досі великого поширення в технічних системах, проте актуальність їхнього застосування не викликає сумнівів.

Нижче наведено аналіз основних методів і конструкцій пристроїв для отримання НЧВ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відкриття фулеренів у 1985 р. [1] (Нобелівська премія з хімії за 1996 р.) і розроблення технології їх отримання в макроскопічних кількостях [2] започаткували систематичні дослідження поверхневих структур вуглецю. Основним елементом таких структур є графітовий шар – поверхня, викладена правильними шестикутниками з атомами вуглецю, розташованими у вершинах. У разі фулеренів [1-3] така поверхня має замкнуту сферичну або сфероїдальну форму. Поверхнева структура фулеренів включає не тільки правильні шестикутники, кількість яких залежить від розміру молекули фулерену, але також 12 правильних п'ятикутників регулярним чином розташованих. Різноманітність незвичайних фізико-хімічних властивостей фулеренів і перспективи їхнього можливого використання цікавлять постійно дослідників з різних галузей науки і техніки.

Разом із сфероїдальними структурами графітовий шар може утворювати також і протяжні структури у вигляді порожнистого циліндра [4]. Подібні структури, які називаються нанотрубками, також відрізняються різноманітністю фізико-хімічних властивостей і мають значний інтерес у дослідників і технологів.

Незабаром після створення технології отримання фулеренів було виявлено [4], що в результаті термічного розпилення графітового анода в електричній дузі разом із молекулами, що належать до сімейства фулеренів, утворюються також протяжні структури, що являють собою згорнуті в одношарову або багатшарову трубку графітові шари. Довжина таких утворень, що отримали назву «нанотрубки», досягає десятків мікронів і на кілька порядків перевищує їхній діаметр, що становить від одного до декількох нанометрів. При цьому, на відміну від фулеренів, які осідають разом із сажею на стінках газорозрядної камери, нанотрубки знаходяться переважно на поверхні катода, звернені до міжелектродного проміжку.

Основними методами отримання вуглецевих нанотрубок є дуговий розряд, лазерна абеляція та каталітичне розкладання вуглецевмісних молекул на металічному каталізаторі. Отримувані вуглецеві матеріали в основному складаються з неупорядкованого вуглецю, одностінних і багатшарових нанотрубок, нановолокон і графенових наночастинок. Розподіл за складом вуглецевих фракцій у вихідному продукті визначає якість отриманого вуглецевого матеріалу і залежить від методу його отримання.

Найбільш чисті нанотрубки отримують при лазерній абеляції графітової мішені за присутності каталізатора. Однак вихід продукту дуже малий. Більш продуктивним є спосіб отримання наноматеріалів у дуговому розряді, хоч ступінь чистоти отриманих нанотрубок значно нижчий. Спосіб хімічного осадження ще недостатньо розроблений, але, судячи з попередніх результатів, є достатньо перспективним.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є покращення антифрикційних і протизносних властивостей індустриальних олив шляхом додавання мікро- та наночастинок вуглецю, отриманих методом випаровування графіту, і встановлення закономірностей впливу концентрації НЧВ на характеристики тертя і зношування в трибосистемах.

Для досягнення вказаної мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз досліджень отримання наночастинок вуглецю та їхнього застосування в трибологічних системах і визначити оптимальний метод для отримання НЧВ.

2. Виконати теоретичні дослідження впливу концентрації мікро- та наночастинок вуглецю на процес зношування деталей транспортно-технологічних та енергетичних машин (ТТЕМ).

3. Виконати теоретичні дослідження процесу фізичної адсорбції мікро- та наночастинок вуглецю на металеві поверхні тертя.

4. Провести мікрофотографічні дослідження вуглецевої сажі, отриманої електродуговим методом і доданої до індустриальної оливи.

5. Встановити закономірності впливу концентрації вуглецевої сажі на трибологічні властивості індустриальних олив при їхньому використанні в парах.

Основна частина досліджень

1. Аналіз методів отримання наночастинок вуглецю та їхніх фізичних властивостей

1.1. Термічне розпилення

Найбільш поширений метод отримання вуглецевих нанотрубок використовує термічне розпилення графітового електрода в плазмі дугового розряду, що горить в атмосфері He [4]. Цей метод, що лежить також в основі найбільш ефективної технології виробництва фулеренів [2, 3], дає змогу отримувати нанотрубки в кількості, достатній для детального дослідження їхніх фізико-хімічних властивостей. У дуговому розряді постійного струму з графітовими електродами при напрузі 15-25 В, струмі кілька десятків ампер, міжелектродній відстані кілька міліметрів і тиску He кілька сот торрів (1 Торр = 0,00133 Бар) відбувається інтенсивне термічне розпилення матеріалу анода. Продукти розпилення, що містять разом із частинками графіту також і фулерени, осаджуються на стінках розрядної камери, що охолоджується, а також на поверхні катода, більш холодного порівняно з анодом. Розглядаючи цей катодний осад за допомогою електронного мікроскопа, Іджима [4] виявив, що в ньому містяться протяжні циліндричні трубки довжиною понад мікрон і діаметром кілька нанометрів, поверхня яких утворена графітовими шарами. Трубки мають куполоподібні наконечники, що містять, подібно до молекул фулеренів, шестикутники і п'ятикутники. Трубки характеризуються різною хіральністю, тобто кутом орієнтації графітової площини відносно осі трубки.

В умовах експерименту [4] відносний вміст нанотрубок у катодному осаді не перевищує кілька відсотків, а оскільки трубки, як і інші вуглецеві частинки, присутні в катодному осаді, нерозчинні в органічних розчинниках, завдання їхнього виділення з осаду в чистому вигляді

пов'язане з серйозними технічними труднощами. Наступні дослідження з оптимізації виробництва нанотрубок і підвищення їхнього відносного виходу показали, що умови горіння дуги з графітовими електродами, оптимальні для виробництва нанотрубок, дещо відрізняються від умов, сприятливих з точки зору отримання фулеренів [5, 6]. Насамперед ця відмінність стосується тиску буферного газу (гелію – He), який в оптимальних, з точки зору виробництва нанотрубок, умовах становить не 100-150,

як у випадку фулеренів, а близько 500 Торр (0,66 Бар). Крім того, до підвищення виходу нанотрубок призводить використання катода великого діаметра (понад 10 мм).

Внаслідок оптимізації в установках, спроектованих спеціально з цією метою, стало можливим виробництво нанотрубок у грамових кількостях, а вміст нанотрубок у катодному депозиті перевищив 60 %. Схема однієї з таких установок, докладно описаної в роботі [7], наведена на рис. 1.

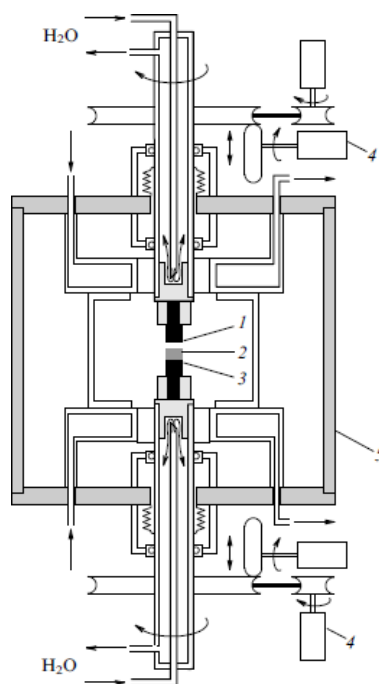


Рис. 1. Схема електродугової установки для отримання нанотрубок у грамових кількостях [7]:

- 1 – графітовий анод; 2 – осад, що містить нанотрубки; 3 – графітовий катод;
 4 – пристрої для автоматичної підтримки міжелектродної відстані на заданому рівні;
 5 – стінка камери. Стрілками показані напрямки прокачування води, що використовується для охолодження

У цій установці особливу увагу приділено організації ефективного відведення тепла від електродів, для чого вони поміщаються в мідні вставки, що охолоджуються за допомогою багатоканальної системи прокачування

води. Крім того, спеціальний автоматизований пристрій забезпечує підтримку міжелектродної відстані на фіксованому рівні 1-2 мм, що сприяє збільшенню стабільності параметрів дугового розряду, яка є необхідною умовою

отримання високого виходу нанотрубок [8, 9]. Максимальний вихід нанотрубок спостерігається при мінімальному струмі дуги, необхідному для її стабільного горіння. Випадкове підвищення струму лише на кілька хвилин перетворює гарну сажу з високим вмістом нанотрубок на марний твердий шматок спеченого графіту. При використанні в роботі [7] циліндричних електродів діаметром 12,5 мм напруга дуги становила 17-20 В, а струм змінювався в діапазоні 110-130 А; у разі використання електродів діаметром 19 мм значення цих параметрів становили 17-19 і 250-300 А відповідно. При цьому на поверхні катода вдавалося зібрати до 90 % усієї маси вуглецю, що виділяється з поверхні анода внаслідок його термічного розпилення. Як показують спостереження, виконані за допомогою сканувального електронного мікроскопа, багат шарові нанотрубки, що утворюються, довжиною до 40 мкм відростають від катода перпендикулярно до його плоскої поверхні і зібрані в циліндричні пучки діаметром близько 50 мкм. Ці пучки рівномірним шаром покривають поверхню катода, утворюючи стільникову структуру, у якій простір між пучками заповнено сумішшю неупорядкованих наночастинок, що також містять нанотрубки. Нанотрубки в пучку мають тенденцію до спікання. Ієрархічна структура сажі, що містить нанотрубки, розглянута також у роботі [9]. За спостереженнями, нанотрубки, зібрані в невеликі пучки, які разом із наночастинами утворюють нитки діаметром до 50 мкм, у свою чергу утворюють нитки більшого діаметра, придатні для спостереження неозброєним оком. В оптимальних умовах вихід нанотрубок із прикатодної сажі досягає 60 %.

Дослідження, виконані за допомогою електронного мікроскопа високої роздільної здатності, показали, що осад, який утворюється на катоді в результаті горіння дуги з графітовими електродами, має складну просторову структуру. Так, у

роботі [10], у якій діаметри графітового катода і анода становили 2,5 і 1,25 см відповідно при тиску He 100 Торр, розрядному струмі 180-200 А і напрузі 20-30 В, зазначено, що на поверхні катода осаджувалася сажа у формі циліндра, що складається з сірого стрижня, покритого чорним кільцем, оточеним сірою оболонкою. Чорне кільце містило безліч нанотрубок різного діаметра і завдовжки десятки мікрометрів. Перехідна область між чорним кільцем і зовнішньою оболонкою містила частинки вуглецю, укладені у графітову оболонку.

1.2. Лазерне розпилення

Як і фулерени, вуглецеві нанотрубки отримують у результаті термічного розпилення графіту. При цьому разом із газорозрядним нагріванням з цією метою ефективно використовуються також інші методи концентрації енергії на графітовій поверхні. Так, у роботі [11] джерелом висококонцентрованої енергії служило імпульсне випромінювання лазера на неодимовому склі. Графітовий стрижень (мішень) діаметром 1,25 см знаходився всередині кварцової трубки діаметром 2,5 см і довжиною 50 см, яку у свою чергу поміщали в піч. Мішень обдувалася аргоном при тиску 500 Торр (0,66 Бар) і опромінювалася імпульсами другої гармоніки випромінювання неодимового лазера ($\lambda = 0,532$ мкм) тривалістю 10 нс, енергією 250 МДж за частоти повторення 10 Гц. Діаметр лазерної плями на мішені становив 3 або 6 мм. Зразки сажі збиралися з водоохолоджуваного приймача, що розміщується в нижньому по потоку кінці трубки, зі стінок кварцової трубки та нижньої частини поверхні графітового стрижня. Ці зразки містили багат шарові нанотрубки з кількістю шарів 4-24 довжиною до 300 нм. Одношарових нанотрубок в осаді не виявлено. Зі зменшенням температури печі якість нанотрубок падала від бездефектних за температури 1200 °С до багатих дефектами за температури 900 °С і повної відсутності

нанотрубок за температури 200 °С. Аналогічна температурна залежність виходу має місце при синтезі фулеренів методом лазерного випаровування. Передбачається, що нанотрубки зростають у газовій фазі.

При синтезі нанотрубок у результаті термічного впливу лазерного випромінювання використання металевих каталізаторів призводить до такого самого якісного ефекту, як у розглянутому вище випадку електродугового синтезу. Зміст нанотрубок у сажі різко зростає, якість значно поліпшується. При цьому замість багат шарових нанотрубок, що характеризуються значним розкидом у діаметрах, утворюються переважно одношарові трубки, діаметр яких змінюється у відносно вузькому інтервалі.

У цьому плані показово є робота [13], по суті продовження цитованої роботи [12]. Тут також використовувалася описана вище експериментальна камера, що поміщається в піч і пристосована для опромінення графітової мішені імпульсами лазерного випромінювання, проте зразки, що опромінювали, являли собою суміш графіту і невеликої кількості металевого порошку. Ці зразки виготовляли у три стадії. На першій стадії пастою, що утворюється в результаті змішування високочистого металу або оксиду металу з вуглецевим зв'язуванням, заповнювали форму діаметром 1,25 см. Потім форму поміщали під гідравлічний прес і витримували за температури 120 °С під постійним тиском протягом 4-5 год. Стрижень вулканізувався за температури 810 °С протягом 8 год під потоком аргону. Отримані мішені нагрівалися в потоці аргону до 1200 °С протягом 12 год. Крім того, перед кожним новим експериментом з однією і тією самою мішенню її витримували в потоці аргону за температури 1200 °С протягом 2 год. Метали використовувалися в таких концентраціях (атомні %): Cu (0,6); Nb (0,6); Ni (0,6); Pt (0,2); Co/Ni (0,6/0,6); Co/Pt (0,6/0,2);

Co/Cu (0,6/0,5); Ni/Pt (0,6/0,2). Випромінювання другої гармоніки ($X = 0,532$ мкм) імпульсного неодимового лазера з енергією в імпульсі 300 МДж фокусувалося на площину металграфітового композита в пляму діаметром 6-7 мм. Мішень перебувала в камері, якою прокачувався аргон при тиску 500 Торр. Камеру розміщували в печі, температура якої могла досягати 1200 °С. Сажа, утворювана в результаті лазерного термічного розпилення мішені, неслася потоком аргону з нагрітої області і осідала на мідний колектор, охолоджуваний водою. Зразки сажі диспергувалися в метанолі за допомогою ультразвуку протягом 1 год, після чого досліджувалися під електронним мікроскопом. Як свідчать дослідження, у сажі разом із наночастинками, що мають форму багатогранників, присутні одношарові нанотрубки діаметром близько 1 нм, вихід яких зростає з підвищенням температури печі. При використанні каталізатора одного металу максимальний вихід нанотрубок спостерігається у випадку Ni, наступним є Cu. Pt дає невеликий вихід, а використання Cu і Nb взагалі не призводить до утворення нанотрубок.

Найбільш яскраво високі можливості методу лазерного випаровування графіту при селективному отриманні нанотрубок із заданими характеристиками були продемонстровані в недавніх експериментах [14, 15], у яких графітова мішень з домішкою нікелевого каталізатора опромінювалася одночасно двома лазерами різної довжини хвилі видимого діапазону. При цьому відбувається переважно (з виходом до 90 %) утворення одностінних нанотрубок певного діаметра (138 нм), що відповідає певній хіральності.

1.3. Електролітичний синтез

Фізичні умови, що сприяють утворенню нанотрубок, дуже різні. Зокрема, нанотрубки ефективно утворюються не тільки в умовах низькотемпературної приповерхневої плазми, яка виникає при електродуговому

або лазерному розпиленні графітової мішені, але також при електролізі, коли всі компоненти процесу знаходяться в конденсованому стані. Уперше електролітичним шляхом нанотрубки отримані в роботі [16], у якій як анод запропоновано використовувати графітовий куб розміром 5 x 5 x 5 см з отвором діаметром 2,5 і глибиною 3 мм, заповненим 1 г солі LiCl. Розплавлена сіль, нагріта до температури 600 °С, служила електролітом. Графітовий катод, що занурюється в розплав, мав діаметр 3 мм. Внаслідок пропускання через електроліт струму 30 А протягом 1 хв на поверхні катода відбувалося утворення нанотрубок та інших наночастинок вуглецю, які досліджувалися за допомогою електронного мікроскопа.

Удосконалений варіант установки для електролітичного синтезу нанотрубок зображений на рис. 2 [17, 18]. У центрі

циліндра діаметром 4 і довжиною 10 см, що відіграє роль анода, висвердлено циліндричний отвір діаметром 3 і глибиною 7 см. Як катод використовувалися графітові стрижні діаметром 3 мм, занурювані в сухий LiCl на глибину 1-3 см. Система заповнювалася Ag при тиску до 500 Торр. Тигель нагрівався до температури плавлення LiCl (604 °С). Електроліз здійснювався при струмах 1, 3, 5, 10, 20 і 50 А, напрузі до 20 В і глибині занурення катода в електроліт від часток сантиметра до 4 см протягом 2 хв. Це давало 30-80 мг вуглецевого матеріалу, який потім протягом 4 год оброблявся в суміші толуолу з водою. Сухий залишок оброблявся за допомогою ультразвуку в ацетоні протягом 20 хв, після чого зразки суспензії наносили піпеткою на мідно-графітову сітку електронного мікроскопа діаметром 3 мм і висушували.

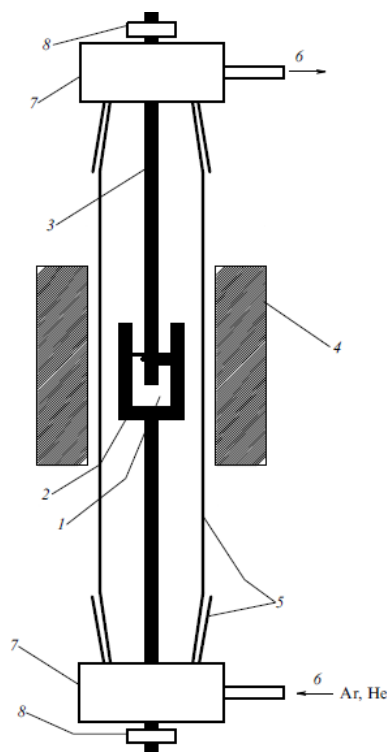


Рис. 2. Схема експериментальної установки для електролітичного синтезу нанотрубок [17, 18]:
 1 – рідкий електроліт; 2 – графітовий анод з отвором; 3 – графітовий катод;
 4 – піч; 5 – кварцова трубка; 6 – трубки для прокачування газу; 7 – мідні фланці;
 8 – кільця ущільнювачів

1.4. Інші методи отримання нанотрубок

Вуглецеві нанотрубки, як і фулерени, ефективно утворюються в широкому діапазоні умов, тому при їхньому синтезі використовуються різні методи та підходи. Разом із наведеними вище слід згадати також роботу [19], у якій продемонстрована можливість отримання фулеренів і нанотрубок у полум'ях ацетилену, бензолу або етилену, попередньо змішаних з киснем і буферним газом. Тиск газу змінювався в діапазоні 20-97 Торр; атомне відношення C/O становило 1,06 у разі C_2H_2 , 0,86-1,0 – у разі C_6H_6 , 1,07 – у разі C_2H_6 за швидкості потоку газу в пальнику $25-50 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ і максимальній температурі полум'я близько $2000 \text{ }^\circ\text{K}$. Зразки сажі відбиралися з полум'я з використанням водоохолоджуваного зонда, що всмоктує, і зі стінок камери згорання, після чого диспергувалися в толуолі за допомогою ультразвуку. Як показує аналіз, виконаний на електронному мікроскопі високої роздільної здатності, зразки містили близько 10 % багаточастинкових наночастинок розміром 2-15 нм з відстанню між шарами 0,34-0,36 нм. Деякі частинки являли собою циліндричні нанотрубки з двома півсферами на кінцях.

Обговорення результатів аналізу.

Порівняння результатів роботи установок, заснованих на різних методах одержання нанотрубок і фулеренів, показує, що найбільш чистий і якісний продукт отримують при лазерному випаровуванні графіту, проте це тривалий, трудомісткий і дорогий процес. Вихід корисних продуктів становить до 20 %.

Термічний метод має свої переваги та недоліки. До переваг слід віднести доступність і дешевизну вуглецевої сировини: від нафти, вуглецевих газів до міських відходів. Усі вони є джерелами нанотрубок і фулеренів при використанні термічного методу. Вихід корисних нанопродуктів середній за величиною, а чистотою досягає 90-95 %.

Найпростішим серед відомих є електродуговий метод отримання нанотрубок і фулеренів. Проте вихід корисних продуктів не перевищує 15 %. Крім того, велика кількість конструкцій реакторів для отримання високоструктурованих наночастинок вуглецю свідчить про те, що досі не знайдено прийнятну конструкцію, яка б гарантувала отримання продукту з заданими властивостями, стабільними параметрами та в необхідних кількостях.

Незважаючи на наявні результати численних досліджень, НЧВ поки що не мають застосування на транспорті, проте, урахувавши унікальні властивості, застосування їх у транспортному машинобудуванні можливе в найближчій перспективі.

Основними напрямками використання НЧВ у цій галузі є:

- створення нових конструкційних матеріалів. Так, за дослідженнями Дженерал Моторс, додавання 11,5 % вуглецевих нанотрубок до поліпропілену призводить до збільшення його міцності на розрив удвічі. Дослідження Токійського університету показали, що додавання 5 % нанотрубок до алюмінію також збільшує його міцність на розрив удвічі. Теоретичні розрахунки показують прогнозоване збільшення міцності сталей і сплавів у шість разів при додаванні до них близько 10 % вуглецевих нанотрубок;

- створення нових антифрикційних матеріалів. Сьогодні можна використовувати НЧВ як легуючу добавку до металевих або композиційних антифрикційних матеріалів підшипників ковзання, напрямних опор тощо;

- створення високоякісних мастильних матеріалів з використанням як присадки НЧВ. Про позитивний вплив таких нанооб'єктів на процеси тертя і зношування в машинах свідчать різні джерела інформації, наприклад [8]. За проведеними дослідженнями, використання вуглецевих фулеренів і наночастинок

графіту, що містяться у фулереновій сажі, як добавки до пластичних мастил Солідол Ж і Літол-24 у кількості 1-1,5 % зменшує коефіцієнт тертя сталевих зразків до двох разів, а інтенсивність зношування до 2,5 раза залежно від режимів навантаження.

Список перелічених напрямів далеко невичерпаний, а розкриваються в роботі лише ті, що можуть бути реалізовані в найближчому майбутньому.

2. Аналіз досліджень з вивчення впливу НЧВ на мастильну здатність оливи

2.1. Аналіз досліджень з вивчення впливу НЧВ на мастильну плівку

2.1.1. Поверхневий шар матеріалу

Поверхневий шар матеріалу (ПШМ) включає зовнішню поверхню, що має безпосередній контакт з навколишнім середовищем, так званий граничний шар, і нижній шар деформованого металу, що відрізняється від основної частини (серцевини) металу своєю будовою, механічними, фізичними і хімічними властивостями.

2.1.2. Граничний шар

Ідеальна структура матеріалу передбачає, що кожен атом, розташований всередині нього, зазнає впливу силових полів навколишніх атомів і перебуває у стані рухливої стійкої рівноваги.

Атоми на поверхні мають зв'язки тільки з сусідніми та нижніми атомами і тому перебувають у невірноваженому та нестійкому стані.

У результаті цього граничний шар металу, що включає приблизно два ряди атомів (товщина його 5×10^{-10} - 10^{-9} мм або 0,5-1 нм) [20], має запас вільної поверхневої енергії. Цю поверхневу енергію можна подати як суму потенційної і кінетичної енергії. Потенційній енергії відповідають спотворення нормальної побудови решітки, а кінетичній – зміна режиму коливань атомів у граничному шарі. З кінетичною енергією пов'язана сильна залежність поверхневої напруги від температури.

Через підвищену активність поверхня ПШМ твердого тіла неминує адсорбує елементи навколишнього середовища та буває покрита шарами адсорбованих газів, парів води та жирів, що часто осаджуються прямо з повітря.

Так, після технічного очищення гасом (уайт-спіритом) або бензином шар жирів становить 1-5 мкм, а при дуже ретельному очищенні – 0,01-0,1 мкм, або шар товщиною 10-100 молекул. Товщина найтоншого шару адсорбованих парів відповідає товщині однієї молекули жирної кислоти, що дорівнює 0,002-0,004 мкм (2-4 нм). Товщина адсорбованої водяної пари становить 50-100 молекулярних шарів і навіть при температурі нагріву до 800-900 °С на поверхні зберігається водяна плівка завтовшки один молекулярний шар. ПШМ сильно адсорбує також гази, при цьому особливо міцні зв'язки дає хімічна адсорбція, при якій товщина шару газів становить 10^{-9} - 10^{-8} мм (1-10 нм) [20].

Адсорбовані шари оливи, особливо поверхнево-активної (ПАР), значно впливають на величину поверхневої енергії та процес пластичного деформування, диспергування поверхневих шарів і міцність металу, оскільки адсорбція знижує поверхневий натяг та енергію поверхневих атомів і полегшує розвиток деформації.

ПШМ і особливо тріщини в ньому чи мікротріщини є хіба що воротами, якими чужорідні атоми проникають у тверде тіло.

Вплив навколишнього середовища призводить до виникнення на поверхні хімічних сполук, найчастіше різних оксидів. Наприклад, біля сталі від поверхні в тіло слідує оксиди Fe_2O_3 ; Fe_3O_4 ; $FeO+Fe_3O_4$; FeO .

Загальна товщина зовнішньої плівки становить у залізі від 1,5-2,5 до 5 нм; у сталі 1-2 нм; цинку 0,5-0,6 нм; алюмінії 10-15 нм.

2.1.3. Нижній шар

Цей шар або частина ПШМ зазвичай складається з сильно деформованого та зміцненого металу. Це основна

полікристалічна структура, що складається з більш-менш рівноважних кристалічних зерен неправильної форми з розмірами від 0,01 до 1,0 мм, зв'язаних міжзеренним прошарком. Ці зерна (кристаліти) побудовані з рядів визначених атомів, що утворюють відповідні цьому металу кристалічні решітки.

Міжзеренний прошарок має спотворену кристалічну решітку з дислокованими атомами основного матеріалу та домішок, що інтенсивно накопичуються біля границь зерен. Прошарок має розпушену будову з ослабленими силами зчеплення та підвищеною енергією атомів. Товщина прошарку становить 5-20 атомних шарів. Чим шар нижче, тим і серцевина металу істотно відрізняється за міцністю від теоретичної міцності цього металу. Так, критичне напруження зсуву $\tau_{кр}$, необхідне для здійснення пластичної деформації, теоретично дорівнює $\tau_{кр.теор} G/30$, МПа: залізо – $\tau_{кр.теор} 2300$ МПа; мідь – $\tau_{кр.теор} 1540$ МПа і нікель – $\tau_{кр.теор} 2600$ МПа [20].

Реальні значення критичної напруги зсуву $\tau_{кр.реал}$ для цих же металів: 29 МПа; 1 МПа та 5,8 МПа. Такі великі розбіжності між теоретичною та фактичною міцністю металів пояснюються наявністю в реальних полікристалах різних недосконалостей і дефектів решітки: точкових дефектів у вигляді вакансій, дислокованих атомів і домішок і лінійних дефектів у вигляді дислокацій різного типу. Дислокації особливо сильно впливають на зниження міцності реальних металів, виникають у реальному кристалі у процесі його зростання з розплаву чи розчину. У недеформованому кристалі джерелом

дислокацій можуть бути скупчення вакансій.

Бездефектні кристали (часто це монокристали) отримані як тонкі нитки товщиною 0,05-0,2 мкм і довжиною 2-10 мм. Межа міцності в них для різних металів така: залізо – 360 МПа; мідь – 260 МПа; цинк – 180 МПа. Пружна деформація в ниткоподібних кристалів досягає кількох відсотків, а звичайних – сотих часток відсотка.

Щільність дислокації ρ (шт./см²) у бездефектних кристалів (монокристалів високої чистоти) становить 0-10³; звичайних відпалених монокристалів 10⁵-10⁶; відпалених полікристалів 10⁷-10⁸; металу після інтенсивної холодної деформації 10¹⁰-10¹² [20].

2.2. Аналіз досліджень з вивчення впливу НЧВ на фізико-механічні властивості металу

Для побудови моделі фізичної адсорбції частинки НЧВ була розроблена розрахункова схема сил [21], що діють на частинку (рис. 3). Якщо на частинку діють лише сили F_E і F_C , то силою тяжіння та архімедовою силою можна знехтувати. Сила електростатичної взаємодії частинки з поверхнею залежить від двох основних факторів, а саме ступеня її поверхневої активності та величини силового поля поверхні тертя. За рис. 3,

$$h = x_0 - x \quad (1)$$

Залежність для сили електричної взаємодії буде мати вигляд

$$F_E = -P \frac{dE_{\pi}}{dh} = \frac{P\sigma}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{(1 - \frac{h}{\sqrt{r^2 + h^2}})}{dh} = \frac{P\sigma}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{r^2 + (x_0 - x)^2}} - \frac{x(x_0 - x)}{\sqrt{r^2 + (x_0 - x)^2}} \right). \quad (2)$$

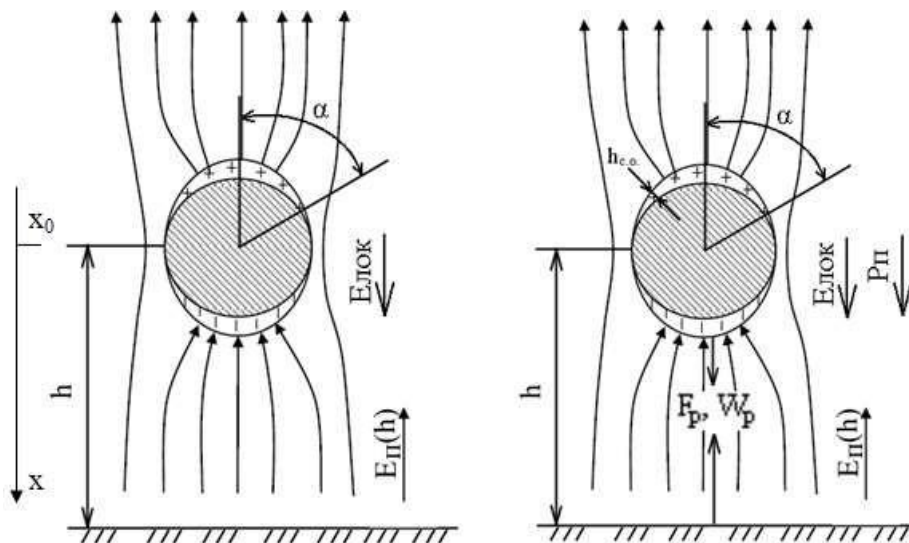


Рис. 3. Розрахункова схема взаємодії частинки з поверхнею тертя:

Ox – вісь, що вказує на напрямок руху елемента; x_0 – початкова відстань до поверхні, м; F_E – сила електростатичної взаємодії (тяжіння), Н; F_C – сила опору руху (сила Стокса), Н; E_P – напруженість силового поля металеві поверхні, В/м; $E_{лок}$ – напруженість локального поля навколо частинки, В/м

Виходячи з положень класичної електростатики, взаємодія наночастинки НЧВ з металевою поверхнею тертя протікає у три етапи: потрапляння частинки в область дії силового поля та її електризація (ліва частина рис. 3); частинки вкриті сольватною оболонкою молекул з формуванням «жорсткого» електричного диполя; адсорбція «жорсткого» електричного диполя – частинки, вкритої молекулами оливи, на поверхню металу (права частина рис. 3).

Визначення дипольного моменту частинки НЧВ виконаємо на основі рекомендацій [22] як

$$P = 4\pi\epsilon_0(R_p + h) \cdot E_P(h), \quad (3)$$

де R_p – радіус частинки, м;

h – товщина сольватної оболонки, м.

Одним із головних завдань також є визначення щільності поверхневого заряду σ ; вирішується з застосуванням моделі «желе». Ураховуючи положення такої моделі, для поверхневого заряду запишемо

$$\sigma = \frac{q^+ - |q^-|}{\lambda^2}, \quad (4)$$

де q^+ , q^- – заряди відповідно іонного вузла поверхні та електронного газу поблизу іонного вузла, Кл;

λ – період атомарної шорсткості поверхні (приблизно дорівнює періоду кристалічної решітки металу), м.

Поєднавши залежності (3) і (4), отримаємо залежність для сили електростатичної взаємодії частинки з металевою поверхнею

$$F_E = \frac{P(q^+ - |q^-|)}{2\pi\epsilon_0\lambda^2} \left(\frac{1}{\sqrt{r^2 + (x_0 - x)^2}} - \frac{x(x - x_0)}{\sqrt[3]{r^2 + (x_0 - x)^2}} \right). \quad (5)$$

Скориставшись залежністю (5) отримаємо рівняння руху частинки диполя в кінцевому вигляді:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{P(q^+ - |q^-|)}{2\pi\epsilon\epsilon_0\lambda^2} \left(\frac{1}{\sqrt{r^2 + (x_0 - x)^2}} - \frac{x(x - x_0)}{\sqrt[3]{r^2 + (x_0 - x)^2}} \right) - 6\pi R\mu \frac{dx}{dt} \quad (6)$$

Залежність (6) урахує як властивості частинок НЧВ – розмір і дипольний момент, так і в'язкість базової оливи та властивості металевої поверхні тертя, на якій адсорбується частинка. До таких властивостей належить період кристалічної решітки металу та його валентність. Зазвичай ідеться про «ювенільну» ділянку поверхні тертя, що

утворюється в процесі зношування та екранується частинками НЧВ та молекулами оливи. На рис. 4 наведені результати частинного розв'язання рівняння (6) в програмному середовищі MathCAD, за якими встановлена закономірність зміни часу адсорбції частинок НЧВ залежно від їхнього радіуса та початкової відстані до поверхні.

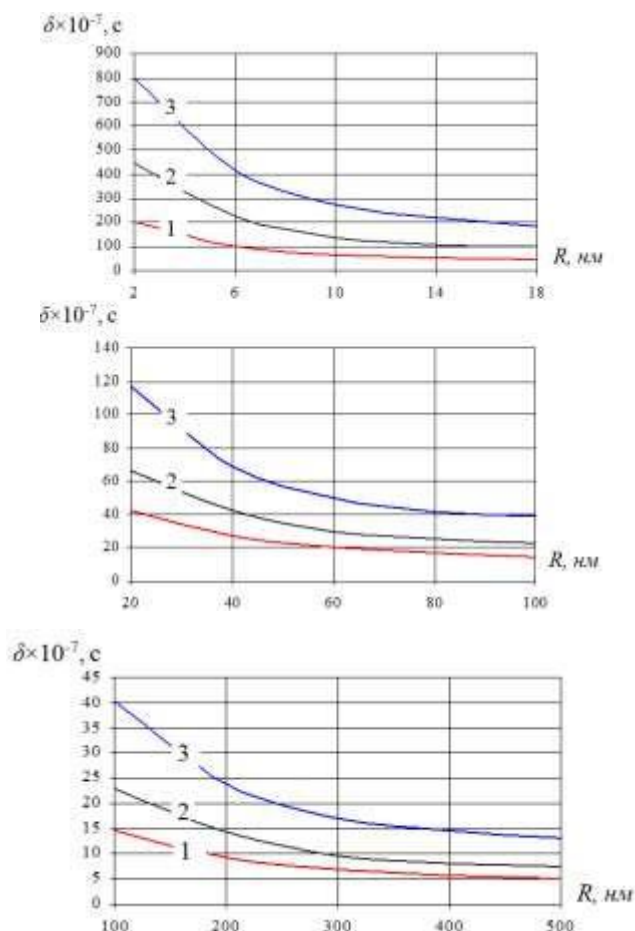


Рис. 4. Зміна часу адсорбції частинок МНЧВ залежно від радіуса та початкової відстані:
 1 – $x_0 = 1$ мкм; 2 – $x_0 = 1,5$ мкм; 3 – $x_0 = 2$ мкм

Отримані закономірності розкривають механізм фізичної адсорбції частинок НЧВ у вигляді електричних диполів. Як видно з графіків рис. 4, час адсорбції нелінійно залежить як від радіуса мікро- та наночастинок НЧВ, так і від початкової відстані частинок до поверхні. Наприклад, при зміні радіуса з 2 до 500 нм і початковій відстані 1 мкм час змінюється приблизно в 40 разів, а при початковій відстані 2 мкм – приблизно в 60 разів. Час адсорбції, за виконаними розрахунками, складає від 10^{-7} до 10^{-4} с залежно від радіуса, що підтверджує отримані раніше експериментальні дані інших дослідників [23]. У цілому розроблена фізична та математична моделі (залежність (6)) процесу фізичної адсорбції електропровідних частинок НЧВ дають змогу отримати практичні дані щодо їхнього розміру та потрібної концентрації в базовій оливі залежно від швидкості відносного переміщення нано- та мікроскопічних ділянок зношування поверхонь тертя.

Слід зазначити також, що, за експериментальними даними інших дослідників [24], отримані дані відносно часу фізичної адсорбції окремих молекул і їхніх агрегатів складають близько 10^{-9} - 10^{-6} с, що підтверджує першочерговість формування сольватної оболонки, а вже потім прояв адсорбції частинок НЧВ.

2.3. Аналіз досліджень з вивчення впливу НЧВ на тертя і знос у технічних системах

Нанесення поверхнево-активних речовин (ПАР) на тверді поверхні можна здійснювати в процесі складання агрегатів і вузлів механізмів або експлуатації через робоче середовище, що є ультрадисперсною системою «олива – ПАР».

Одним з основних факторів, що визначають довговічність і надійність роботи різних двигунів і механізмів, є знос контактуючих поверхонь вузлів тертя, що значною мірою позначається на ресурсі їхньої роботи.

Для зниження величини і стабілізації умов тертя, а також запобігання інтенсивному зносу у вузли тертя вводять різні мастильні середовища. Однак дуже часто вони не дають бажаного ефекту, оскільки в результаті розігріву оливи стікають з поверхні, видавлюються з зони тертя, внаслідок чого в точках контакту виникає нестача.

Слід також зазначити, що фізико-хімічні та експлуатаційні властивості оливи і мастил у процесі їхньої експлуатації у двигунах і механізмах погіршуються набагато раніше, ніж настає час їхньої заміни при технічному обслуговуванні.

Для вирішення зазначеної проблеми доцільно використовувати результати напрямів, що бурхливо розвиваються останнім часом, у фундаментальній і прикладній науці, таких як нанотехнології, наносистеми і наноматеріали.

Однією з властивостей нанооб'єктів є самоорганізація, що отримала розвиток у теорії мономолекулярної адсорбції Ленгмюра [25]. Адсорбція молекул ПАР відбувається активними центрами, які завжди існують на твердій поверхні. Такими центрами можуть бути піки та піднесення, наявні на будь-якій, навіть найгладшій, поверхні. Внаслідок малого радіуса дії адсорбційних сил, що мають природу, близьку до електростатичної, і здатності їх до насичення кожен активний центр, адсорбуючи молекулу ПАР, стає вже нездатним до подальшої адсорбції. У результаті цього на поверхні може утворитися лише мономолекулярний шар ПАР (рис. 5).

Відомо, що в машинобудуванні прагнуть забезпечити гідродинамічний режим тертя у всіх вузлах, тобто ввести в них рідинне мастило [26], коли здійснюється повний поділ поверхонь, що труться, у результаті тиску, що виникає в рідині при відносному русі поверхонь.

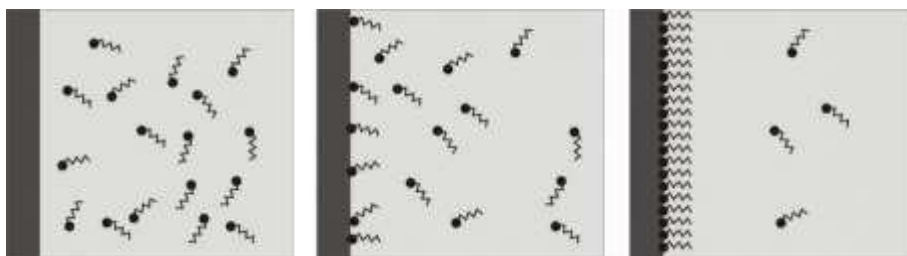


Рис. 5. Процес формування моношару орієнтованих молекул ПАР на поверхні твердого тіла

Сила тертя (F) при взаємному переміщенні двох поверхонь твердих тіл складається з адгезійного F_a і когезійного F_k опорів

$$F = F_a + F_k. \quad (7)$$

Залежно від виду та умов тертя, а також структури тіл і зв'язків у них окремі складові формули (7) можуть збільшуватися або зменшуватися і навіть зникати зовсім. Так, при внутрішньому терті мастила адгезійна складова близька до нуля, а при зовнішньому терті ідеально гладких поверхонь когезійний компонент дорівнював би нулю. Крім зазначених крайніх випадків, коли один із доданків дорівнює нулю, існує безліч проміжних ситуацій, при яких обидва доданки мають значні величини [27].

При гідродинамічному режимі частинки мастила, що стикаються з поверхнями контакту, міцно адсорбуються на них, проміжні ж шари рухаються в

зазорі між поверхнями, що труться (рис. 6), підкоряючись законам гідродинаміки.

В'язкість мастила (η) є найважливішою фізико-хімічною властивістю, що впливає на силу тертя (F):

$$F = \eta VS/H, \quad (8)$$

де V – відносна швидкість руху поверхонь;
 H – товщина шару мастила;
 S – площа ковзання.

$$H = \sum \Delta h_i,$$

де Δh_i – товщина елементарного шару.

З формули (8) випливає, що сила тертя є функцією таких величин:

$$F = f(\eta, V, S, H). \quad (9)$$

Величини S і V задаються конструкційними та експлуатаційними характеристиками на етапі проектування вузлів, механізмів і систем двигуна.

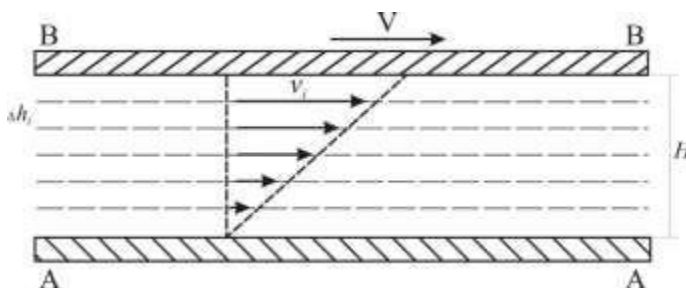


Рис. 6. Механізм внутрішнього тертя при взаємному ковзанні твердих тіл: BB – рухоме тверде тіло; AA – нерухоме тверде тіло; V – відносна швидкість руху твердих тіл; Δh_i – товщина елементарного шару мастила, між якими за наявності градієнта швидкості виникає внутрішнє тертя; v_i – швидкість i -го шару; H – товщина шару мастила

Наблизити процес тертя до ідеального можна за допомогою організації тертя, тобто шляхом зменшення його залежності від в'язкості мастила (η) і кількості шарів,

що зсуваються. Цей результат можна забезпечити, створивши на поверхнях контакту моношари з ПАР (рис. 7).

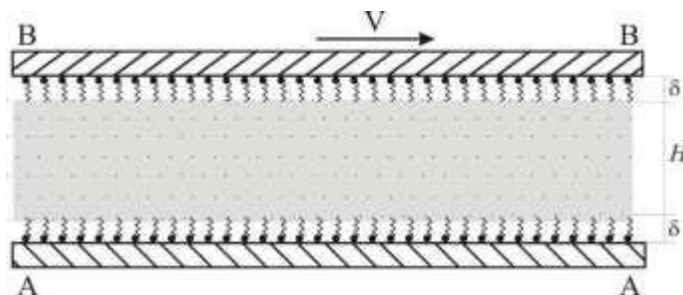


Рис. 7. Механізм внутрішнього тертя при взаємному ковзанні двох твердих тіл, на поверхнях яких нанесено моношар ПАР:

ВВ – рухоме тверде тіло; АА – нерухоме тверде тіло; V – відносна швидкість руху твердих тіл; H – товщина шару мастила; δ – товщина моношару орієнтованих молекул ПАР на поверхні твердого тіла

Отримані мономолекулярні плівки запобігають адсорбції мастила твердою поверхнею, що значно зменшує залежність сили тертя від в'язкості мастильного матеріалу і тертя між його шарами.

Отже, ми максимально наближаємо процес тертя до ідеального.

Розглянемо інший аспект процесу тертя – знос поверхонь тертя. Відомо, що гідродинамічний режим роботи мастила при відповідній в'язкості, допустимих відносних швидкостях переміщення поверхонь, що труться, не дуже високих навантаженнях і температурах дає змогу отримати товсту мастильну плівку, яка має повністю захистити вузол тертя двигуна від зносу. Практика показує, що знос, проте, має місце. Справа в тому, що, по-перше, дуже важко повністю очистити мастильний матеріал від абразивних частинок; по-друге, не завжди, особливо в момент торкання, вузол тертя «потрапляє» в гідродинамічний режим, а при великих навантаженнях мастило видавлюється з вузла тертя.

Висновки. 1. Мета і завдання дослідження досягнуто. Проведено аналіз останніх досліджень методів і приладів

отримання наночастинок вуглецю. Визначено сферу їхнього практичного застосування.

2. За проведеним аналізом досліджень отримання наночастинок вуглецю та їхнього застосування в трибологічних системах, для промислового отримання НЧВ може бути використаний термічний метод. Для лабораторного отримання та проведення науково-дослідних робіт у галузі вивчення НЧВ доцільно використовувати електродуговий метод і метод лазерного випаровування. Вони поєднують можливість управління складом вихідного продукту з простотою отримання НЧВ.

3. Найбільш перспективним щодо застосування високоструктурованих наночастинок вуглецю є створення нових конструкційних антифрикційних матеріалів і присадок до мастильних матеріалів.

4. Впровадження НЧВ потребує проведення спеціальних теоретичних та експериментальних досліджень.

5. Аналіз досліджень з вивчення впливу НЧВ показав, що існує залежність для визначення інтенсивності зношування

пар тертя ковзання при пружному контакті, яка враховує концентрацію НЧВ в оливі та тиск у контакті. За отриманою залежністю, інтенсивність зношування обернено пропорційна концентрації НЧВ і прямо пропорційна контактному тиску.

6. Наведена математична модель процесу фізичної адсорбції електропро-

відних частинок НЧВ на металевій поверхні дає змогу отримати практичні рекомендації щодо їхнього розміру та потрібної концентрації в базовій оливі залежно від швидкості відносного переміщення нано- та мікроскопічних ділянок зношування поверхонь тертя.

Список використаних джерел

1. Kroto H. W. et al. Buckminsterfullerene. *Nature*. 1985. № 318. Pp. 162-163. URL: [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkozje\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1590802](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkozje))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1590802) (last access: 30.09.2023).
2. Kraetschmer W. et al. Solid C60: A New Form of Carbon. *Nature*. 1990. № 347. Pp. 354-358. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4612-0531-9_7 (last access: 25.10.2023).
3. Воронін С. В., Онопрейчук Д. В., Суранов О. О., Амінов Д. О. Огляд та аналіз конструкцій установок для отримання наночастинок вуглецю електродуговим методом. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. Харків: УкрДАЗТ, 2013. Вип. 141. С. 253-258. URL: <http://csw.kart.edu.ua/article/view/72468> (дата звернення: 28.10.2023).
4. Iijima S. Helical Microtubules of Graphitic Carbon. *Nature* (London). 1991. № 354. Pp. 56-58. URL: [https://www.scirp.org/\(S\(i43dyn45teexjx455qlt3d2q\)\)/journal/paperinformation.aspx?paperid=48803](https://www.scirp.org/(S(i43dyn45teexjx455qlt3d2q))/journal/paperinformation.aspx?paperid=48803) (last access: 15.08.2023).
5. Harris P. J. Carbon Nanotubes and Related Structures. Cambridge: Cambridge University Press. 1999. 23 p.
6. Dresselhaus M. S., Dresselhaus G. and Saito R. Carbon Fibers Based on C60 and Their Symmetry. *Physical Review*. 1992. В 45, 6234. URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.45.6234>
7. Hamada N., Sawada S. and Oshiyama A. New One-Dimensional Conductors: Graphitic Microtubules. *Physical Review Letters*. 1992. № 68, 1579. URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.68.1579> (last access: 11.03.2023).
8. Iijima S. and Ichihashi T. Single-Shell Carbon Nanotubes of 1-nm Diameter. *Nature*. 1993. № 363. Pp. 603-605. URL: <http://dx.doi.org/10.1038/363603a0> (last access: 17.07.2023).
9. Ebbesen T. W. and Ajayan P. M. Large-Scale Synthesis of Carbon Nanotubes. *Nature*. 1992. № 358. Pp. 220-222. URL: <http://dx.doi.org/10.1038/358220a0> (last access: 04.12.2023).
10. Charlier J.-C. and Iijima S. Growth Mechanisms of Carbon Nanotubes. *Topics in Applied Physics*. 2001. № 80. Pp. 55-81. URL: http://dx.doi.org/10.1007/3-540-39947-X_4 (last access: 27.11.2023).
11. Krause B., Ritschel M. et al. Comparison of Nanotubes Produced by Fixed Bed and Aerosol-CVD Methods and Their Electrical Percolation Behaviour in Melt Mixed Polyamide 6.6 Composites. *Composites Science and Technology*. 2010. № 70. Pp. 151-160. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.09.018> (last access: 12.10.2023).
12. Mayne M., Grobert N. et al. Pyrolytic Production of Aligned Carbon Nanotubes from Homogeneously Dispersed Benzene-Based Aerosols. *Chemical Physics Letters*. 2001. № 338. Pp. 101-107.
13. Barreiro A., Kramberger C. et al. Control of the Single-Wall Carbon Nanotube Mean Diameter in Sulphur Promoted Aerosol-Assisted Chemical Vapour Deposition. *Carbon*. 2007. № 45. Pp. 55-61. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2006.08.013> (last access: 03.04.2023).

14. Andrews R., Jacques D. et al. Continuous Production of Aligned Carbon Nanotubes: A Step Closer to Commercial Production. *Chemical Physics Letters*. 1999. № 303. Pp. 467-474.
15. Bell M. S., Teo K.B.K. and Milne W.I. Factors Determining Properties of Multi-Walled Carbon Nanotubes/ Fibres Deposited by PECVD. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2007. № 40. Pp. 2285-2292.
16. Nolan P. E., Lynch D. C. and Cutler A. H. Carbon Deposition and Hydrocarbon Formation on Group VIII Metal Catalysts. *The Journal of Physical Chemistry*. 1998. В 102. Pp. 4165-4175. URL: <http://dx.doi.org/10.1021/jp980996o> (last access: 04.12.2023).
17. Woo Y. S., Jeon D. Y. et al. In Situ Diagnosis of Chemical Species for the Growth of Carbon Nanotubes in Microwave Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition. *Diamond and Related Materials*. 2002. № 11. Pp. 59-66. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-9635\(01\)00519-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-9635(01)00519-2) (last access: 12.07.2023).
18. Delzeit L., McAninch I. et al. Growth of Multiwall Carbon Nanotubes in an Inductively Coupled Plasma Reactor. *Journal of Applied Physics*. 2002. № 91. 6027. URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1465101> (last access: 21.09.2023).
19. Меууарпан М. А Review of Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition of Carbon Nanotubes. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2009. №42 (21). DOI:10.1088/0022-3727/42/21/213001.
20. Нанотехнології на залізничному транспорті: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / Є. М. Лисіков, С. В. Воронін, О. О. Скорик, Д. В. Онопрейчук. Харків: Діса плюс, 2013. 212 с.
21. Лысиков Е. Н. Физические основы механизма воздействия внешнего электростатического поля на структуру рабочей жидкости гидроприводов строительных и дорожных машин. *Вестник Харьковского государственного автомобильно-дорожного технического университета*. Харьков: РИО ХГАДТУ, 2000. Вып. 11. С. 44–47. URL: http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/5638/1/dis_Stefanov.pdf (дата звернення: 10.10.2023).
22. Суранов О. О. Покращення мастильної здатності індустриальних олиив шляхом використання продуктів випаровування графіту: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Хар. нац. техн. с.-г. ун-т ім. П. Василенка. Харків: УкрДУЗТ, 2018. 20 с. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=Vkhdtusg_2018_192_38 (дата звернення: 18.10.2023).
23. Войтов В. А., Трошин О. Н., Багров В. А. Математическая модель распределения энергии между элементами трибосистемы в процессе трения и методика расчета. Ч. I. Математическая модель определения скорости работы диссипации в элементах основных трибосистем. *Проблеми трибології*. 2006. № 3 (41). С. 20-28.
24. Воронін С. В. Трибофізичні основи забезпечення мастильної здатності рідкокристалічних присадок до базових олиив: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Харків: УкрДУЗТ, 2015. 40 с. URL: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=Vejte_2015_3\(7\)_11](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=Vejte_2015_3(7)_11) (дата звернення: 10.09.2023).
25. Лысиков Е. Н. Теоретические основы интенсификации адсорбционной способности рабочих жидкостей. *Вестник Харьковского государственного автомобильно-дорожного технического университета*. Харьков: РИО ХГАДТУ, 1997. Вып. 6. С. 41–43.
26. Трибологія: підручник / М. В. Кіндрачук, В. Ф. Лабунець, М. І. Пашечко, Є. В. Корбут. Київ: НАУ-друк, 2009. 392 с.

27. Ремарчук М. П. Зменшення тертя в елементах гідросистем мобільних машин на основі теорії рідинного мащення. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. Харьков: Технологический центр, 2005. № 3/2(15). С. 28–32.

Воронін Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-8443-3222. Тел.: +38(095)500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Ремарчук Микола Парфенійович, доктор технічних наук, професор кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-4003-5107. Тел.: +38 (068) 48-15-320. E-mail: remarchyk@ukr.net

Суранов Олексій Олексійович, кандидат технічних наук, кафедра машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-8449-2038. Тел.: +38 (093) 69-58-907. E-mail: lhornet.hneu@gmail.com.

Суранов Олексій Владиславович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-7515-8177. Тел.: +38(095)810-69-75. E-mail: lhornet.hneu@kart.edu.ua.

Бабенко Андрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6486-468X. Тел.: +38 (097) 000-93-97. E-mail: babenko_ngkg@kart.edu.ua.

Voronin Serhii, Dr. Sc. (Tech.), professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-8443-3222.

Tel.: +38 (095) 500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Remarchyk Mykola, Dr. Sc. (Tech.), professor, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-4003-5107. Tel.: +38 (068) 48-15-320. E-mail: remarchyk@ukr.net.

Suranov Oleksii O. PhD (Tech.), Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-8449-2038. Tel.: +38(093) 69-58-907. E-mail: lhornet.hneu@gmail.com.

Suranov Oleksii V., PhD (Tech.), Associate professor, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-7515-8177. Tel.: +38(095) 810-69-75. E-mail: lhornet.hneu@kart.edu.ua.

Babenko Andrii, PhD (Tech.), Associate professor, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6486-468X. Tel.: +38 (097) 000-93-97. E-mail: babenko_ngkg@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 27.11.2023 р.