

10.31653/smf48.2024.31-45

Козицький С. В.

Національний університет “Одеська морська академія”

ЗАСТОСУВАННЯ НАНОМТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА РЕСУРСУ СУДНОВИХ УСТАНОВОК

Постановка проблеми в загальному вигляді. Область науки і техніки, яка стрімко розвивається у 21 столітті, та спрямована на отримання матеріалів з особливими властивостями, до складу яких входять елементи з розміром у діапазоні 1 – 100 нанометрів, має назву нанотехнологія [1]. Запровадження наноматеріалів для підвищення ефективності судна та його установок актуальна задача сьогодення.

Аналіз досліджень та публікацій. Фізичні та хімічні властивості нанорозмірних частинок суттєво відрізняються від відповідних для традиційних матеріалів [2]. Такі особливі властивості [3] пов’язані з розмірними ефектами та особливостями їх поведінки.

Зазначимо, що 1 г речовини утвореної сферичними частинками розміром 10 нм має площу поверхні $\sim 100 \text{ м}^2$, а частка поверхневих атомів складає 30% [4]. Надлишкова поверхнева енергія приводять до суттєвої нерівноважності наночастинок [5], яка посилюється методами їх отримання [6]. Для усіх наночастинок спостерігається зміна фундаментальних фізичних параметрів [7], а наноматеріали характеризуються підвищеною твердістю в 2...7 разів, межею міцності в 1,5...8 разів, межею плинності в 2...3 рази у порівнянні з традиційними матеріалами [8]. Поведінка наночастинок виходить за рамки класичного уявлення про їх рух [3] і потребує застосування рівнянь нерівноважної термодинаміки [9] та квантової механіки [10].

Постановка задачі. У морському транспорті велика кількість проблем вимагає ефективного вирішення. Серед основних зазначимо: підвищення ефективності суднових систем, збільшення ресурсу суднових механізмів та корпусу, збільшення ККД механізмів і захист довкілля від викидів. Більшість цих проблем є можливість вирішувати шляхом використання унікальних властивостей наноматеріалів. У роботі [11] описані основні властивості наночастинок і наноматеріалів, а у роботі [12] розглянуті питання застосування наночастинок для збільшення ресурсу та ефективності суднових механізмів. У даній роботі розглядаються питання перспективи використання

наноматеріалів з метою ефективного вирішення зазначених вище проблем та особливості механізму дії наноматеріалів.

Виклад основного матеріалу.

Традиційні мастильні присадки, які використовуються для захисту від зносу та для зменшення тертя, базуються на так званих діалкілдітіофосфатах цинку (ДДФЦ) та інших похідних органічних жирних кислот. ДДФЦ містять фосфор, який отруює каталізатори вихлопних газів, що є серйозною проблемою для навколишнього середовища. Інша проблема полягає в тому, що традиційні присадки призводять до водневої крихкості, мікропітінгу та білих поверхневих тріщин (БПТ), що спричиняє втому металу. Окрім того, трибоплівки, утворені ДДФЦ, є твердими і доволі крихкими. У результаті утворюються абразивні частинки, які також збільшують знос. Тому пошук альтернативних присадок, є важливою задачею, яка успішно вирішується застосуванням нанорозмірних матеріалів.

Застосування наноматеріалу ХАДО

ХАДО – це українська компанія [13] заснована у 1991 році в Харкові, яка є виробником ревіталізанту, який запатентовано у 1998 році. За зовнішнім виглядом ревіталізант ХАДО є гелем або пластичною речовиною. Складається з високомолекулярного мастильного середовища, до складу якого входить дуже активна карбоксильна група – COOH , а також суміші нанорозмірних оксидів Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 та їх гідратів, або Al_2O_3 , MgO і Fe_2O_3 чи Al_2O_3 , CaO та Fe_2O_3 і їх гідратів. наночастинки цієї речовини мають форму близьку до сферичної.

Введення ревіталізанта до мастильних матеріалів приводить до формування захисного покриття на металевих деталях механізмів, які труться, безпосередньо у процесі їхньої експлуатації [14]. Процес формування захисного покриття, який називається ревіталізація, він заснований на фізико-хімічній взаємодії поверхонь тертя у присутності ревіталізанта при граничному або змішаному режимах змащення. Механізм утворення захисної плівки при використанні ревіталізанта зображено нижче на рис. 1.

В результаті процесу ревіталізації утворюється металокерамічне градієнтне покриття. Особливість процесу – це зміцнення покриття з одночасним його «зростанням», що має високу контактну міцність і пластичність, гарну теплопровідність [14]. Утворене покриття збільшує фактичну площу контакту, знижує коефіцієнт тертя та зношування, а також захищає поверхні від схоплювання і зварювання.

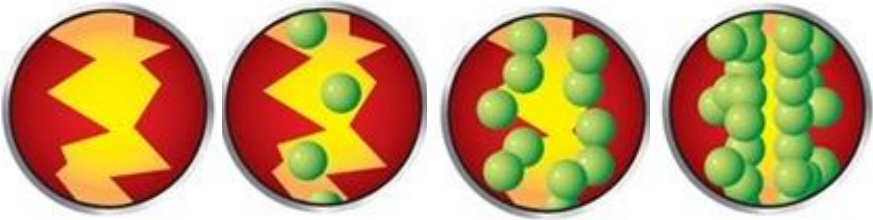


Рис. 1. Етапи ревіталізації в зоні тертя “метал – метал” і утворення захисної плівки, яка захищає пару тертя від зношування [13, 14]

Ревіталізант проявляє унікальні властивості при використанні присадок до мастильних матеріалів, що застосовуються для змащення поверхні циліндрів. На рис. 2 наведені дані про відновлення поверхні циліндра двигуна внутрішнього згорання де спостерігалися подряпини глибиною до 0,1 мм, які зникають при введенні ревіталізанта у мастильний матеріал.

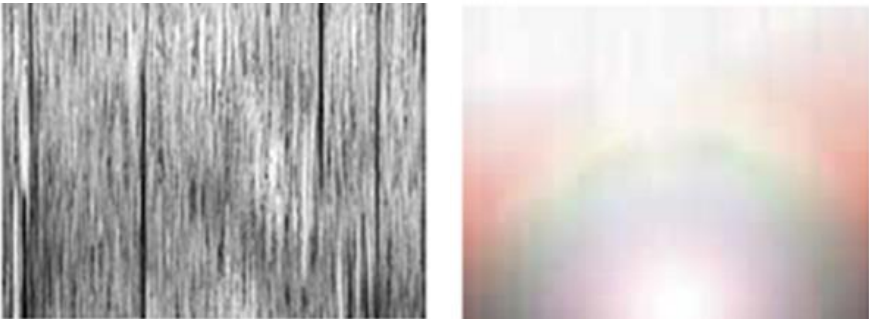
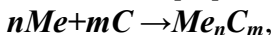


Рис. 2. Зліва – подряпини глибиною до 0,1 мм на поверхні циліндра двигуна, справа – відновлення поверхні шляхом утворюється гладкого металокерамічного покриття [15]

Явище ревіталізації дає можливість повернути процес зносу у зворотному порядку і відновити зношену поверхню шляхом утворення металокерамічного покриття. Ревіталізація починається в зоні найбільшого зносу, оскільки саме тут досить надлишкової енергії для початку нового процесу та атоми металу мають найбільшу кількість некомпенсованих зв'язків, які захоплюють і утримують саме в місцях зносу будівельний матеріал - ревіталізант. Таким чином, на старій основі формується нове покриття. Речовини, що входять до складу ревіталізанта, під дією тиску та температури, що виникають

між деталями при терті, виступають у ролі каталізатора утворення карбідів металів [15] за схемою



де Me – метал; C – вуглець.

За участі карбідів і стертих з робочих поверхонь часточок металу, що перебувають у мастильному матеріалі, у зоні надлишкової енергії формується новий захисний шар. Завдяки дифузії захисного шару в метал, утворюється супер міцне градієнтне покриття з унікальними позитивними експлуатаційними властивостями.

Демонстрація утворення покриття зображена на рис. 3: а) зовнішній вигляд доріжки кочення підшипника зі спеціально нанесеним дефектом, б) початкова поверхня деталі при збільшенні, в) дія ревіталізатору через 15 хв. - зникають дрібні подряпини та починається відновлення поверхні, г) усунений дефект поверхні після одної години ревіталізації за рахунок утворення металокерамічного покриття.

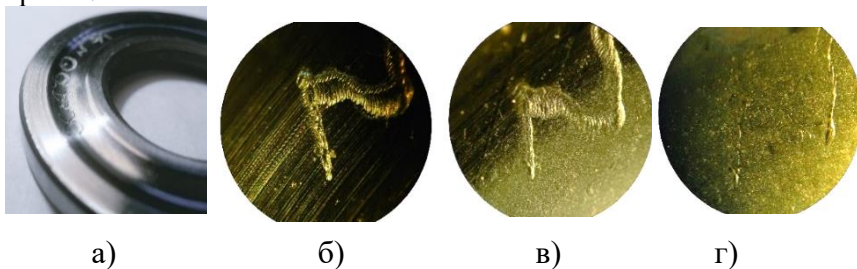


Рис. 3. Процес утворення металокерамічного покриття [15]

Утворення металокерамічного покриття відбувається при одночасній взаємній дифузії двох речовин (металу і металокераміки), яка завершує процес формування нового покриття, цементує і тим самим остаточно знищує дефект. Також чим більше проходить часу, тим більш міцніше стає новоутворене покриття.

Ревіталізатор розв'язує завдання безрозбірного ремонту, збільшення ресурсу та максимально беззношувальної експлуатації машин і механізмів *лише тоді, коли компоненти є нанорозмірні*, та не спостерігається при використанні складових мікронних розмірів. Більше того, кварцовий пісок (SiO_2) та кристалічний корунд (Al_2O_3), якщо би входили до складу присадки у мікронному виді, то діяли би як абразиви зношуючи поверхні пар тертя.

Компанія «XADO» також повідомляє [13-15], що використання ревіталізатору дає наступні результати

у двигунах внутрішнього згоряння:

- усунення овальності та конусності на робочій поверхні циліндрів двигуна до 0,15 мм;
 - повне усунення подряпин і мікрозадирів на робочій поверхні циліндрів глибиною до 0,1 мм;
 - підвищення ресурсу робочої поверхні циліндрів до 2,5 разів;
 - економію палива до 18%;
 - зниження СО і НС у викидних газах від 2 до 10 разів.
- у підшипниках кочення:**
- зменшення радіальних зазорів до 0,07 мм;
 - збільшення ресурсу в 2 ~ 4 рази.

1.Застосування наноматеріалу Nano Vit Motor Renovator

Ефективним є німецький наноматеріал Nano Vit Motor Renovator (NVMR або НАНОВІТ). Він застосовується в системах змащення дизельних двигунів внутрішнього згоряння. Продукт перевірений на ефективність і сертифікований TUV THURINGEN сертифікат номер 8141.076.06.44. Продукт є сумішшю нанодисперсних порошоків (5-10 нм) SiO_2 - 80%, (10-70 нм) Al_2O_3 - 10% та терморасщепленого інтеркальованого графіту - 10% [16].

Наноматеріал NVMR сумісний з будь-яким видом масла, в силу своєї хімічної пасивності не вступає у взаємодію з пакетом стандартних присадок і не змінює властивостей товарного масла. Зауважимо, що при застосуванні NVMR [16] присадка по масі становить 0,03–0,05% за рахунок великої питомі поверхневої енергії наночастинок, яка складає 156 м^2 на один грам.

При використанні NVMR як присадки нанорозмірні матеріали взаємодіють із поверхнями тертя та утворюють захисні плівки [17] за наступним механізмом. У зоні тертя, де виникають високі напружень, відбувається розрив зв'язків алюміній-кисень у триоксиді алюмінію, що викликає впровадження атомів алюмінію у поверхні деталей. Утворена плакувальна плівка представляє собою твердий розчин зі значною пластичністю та міцністю, а частинки графіту, де сильний ковалентний зв'язок між атомами у шарі та слабкий Ван-дер-Ваальсовий між шарами, на поверхнях тертя забезпечують низький коефіцієнт тертя між деталями.

Розбирання двигунів показало (рис.3), що в результаті використання NVMR відбувається модифікація поверхонь тертя, яка викликає різке зростання адгезії молекул масла до поверхонь металу і в

зонах тертя утворюються стійкі плівки, які утримують мастильний матеріал. Діоксид кремнію SiO_2 та графіт створюють двовимірний ковзний шар, що різко знижує будь-які додаткові пошкодження фрикційних частин двигуна. Масло не стікає з її поверхонь, що додатково захищає пари тертя при холодному пуску двигуна від підвищеного зносу та відновлює дзеркало циліндра (рис.3). Як наслідок, забезпечується гідродинамічний режим змащення, механічні втрати у двигуні скорочуються до 30%, та істотно знижується знос.

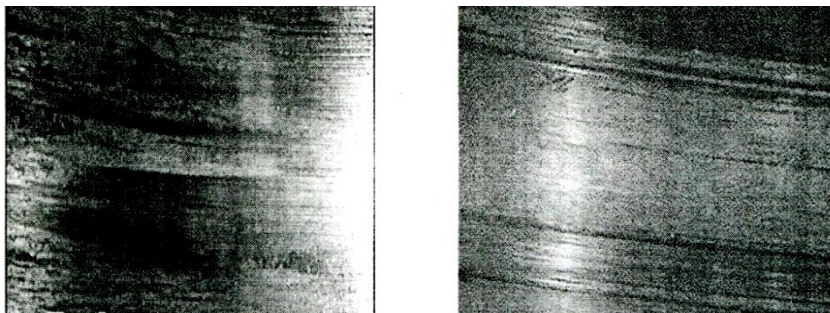


Рис. 3. Результат використання продукту NVMR –відмивання поверхні циліндра та відновлення його “дзеркала” [17]

Дослідним шляхом встановлено, що NVMR продовжує терміни експлуатації моторних масел в кілька разів. Встановлено [16,19], що після 50000 годин експлуатації суднового дизель-генератора додавання в моторне мастило продукту NVMR в процесі подальших 12000 годин роботи призвело до збільшення до 30% тиску стиснення в циліндрах, зниження коефіцієнта тертя до оптимального значення через 6000 годин роботи, підвищення в 4 рази періоду між плановими (3000 годин) замінами мастила, економії палива до 12% і очищенню поверхонь тертя від відкладень продуктів згоряння

Антифрикційні властивості NVMR багаторазово перевірялися в різних умовах змащення, при різних величинах навантаження і концентраціях продукту в маслі [18]. Були зроблені однозначні висновки про зниження коефіцієнтів тертя при певних умовах до значень 0,01-0,001, причому зі збільшенням навантаження реєструвалися більш низькі значення коефіцієнтів.

Випробування на реальному двигуні при високих навантаженнях показали, що обробка NVMR призводить до зниження швидкості зносу поршневих кілець в 3 рази, а вкладишів підшипників колінчастого вала в 5 і більше разів [19].

Зменшення внутрішніх механічних втрат у вузлах тертя двигуна при застосуванні NVMR зумовлює зниження витрати палива і зростання економічності двигуна. Випробування на стенді показали приріст максимальної потужності двигунів на 2-3% після обробки NVMR. Реальне зменшення витрат палива в режимах великих навантажень двигунів становить 5 - 8%. Крім того, оброблений двигун в півтора-два рази швидше виходить на ті ж значення крутного моменту, що необроблений [20].

Відмітимо вплив наноматеріалу NVMR на зменшення викидів, повноту згоряння палива та зниження рівня шуму. Дрезденський інститут FSD випробував дизельні двигуни внутрішнього згоряння при різних умовах експлуатації із додаванням NVMR.

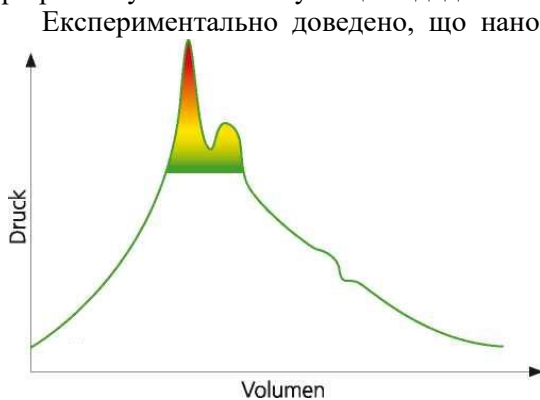


Рис.4. Залежність тиску при спалюванні палива при застосуванні NVMR [21]

Експериментально доведено, що нанокристали Al_2O_3 , які входять у склад NVMR накопичуються на поверхні камери згоряння і діють як незліченна кількість «міні-свічок запалювання». Ці «міні-свічки» викликають згладжування вибухового піку максимального тиску, що відмічено на рис.1, та контрольоване згоряння палива. При цьому в камері згоряння відбу-

вається модифікація поверхонь тертя та їх ретельне очищення. Рівномірне згоряння палива без локальних максимумів температури і тиску призводить до зменшення споживання палива та викидів забруднюючих речовин від двигунів внутрішнього, значно зменшуються вібрації.

Зменшення шуму роботи двигуна перевірялося прямими вимірами з використанням спеціальної апаратури [20]. Зниження рівня шуму на оброблених NVMR двигунах лежить в діапазоні від 1,5 до 2 разів.

Використання NVMR дає наступні результати:

- • Ретельне очищення двигуна, особливо поверхонь тертя;
- • Модифікація поверхонь тертя;

- • Зменшення внутрішніх механічних втрат двигуна;
- • Зниження витрати моторного масла;
- • Економія палива;
- • Зменшення викидів забруднюючих речовин;
- • Зниження рівня шуму;
- • Збільшення часу роботи двигуна.

3. Застосування наноматеріалу NANOL

У 2010 році в місті Гельсінкі (Фінляндія) була заснована компанія «Nanol Technologies Ltd.», яка розробляє, виготовляє та реалізує присадки і добавки до змащувальних матеріалів, мастил, моторних олів і різного виду пального, яке використовується на морському транспорті та у важкій промисловості і автомобільній сфері.

Інноваційна технологія [21] полягає у формуванні захисного наночастинки міді, який не дає водню руйнувати контактні поверхні. Зважені наночастинки міді, що входять до складу наноматеріалів компанії, утворюють тонкий захисний шар лише на поверхнях тертя і у зонах контакту. Формування наноплівки у продуктах компанії NANOL відбувається [22,23] шляхом поверхневої активації, яка запускає окислювально-відновну реакцію, що зменшує кількість іонів міді в добавці з подальшим відкладенням частинок міді на поверхні металу (рис.5).

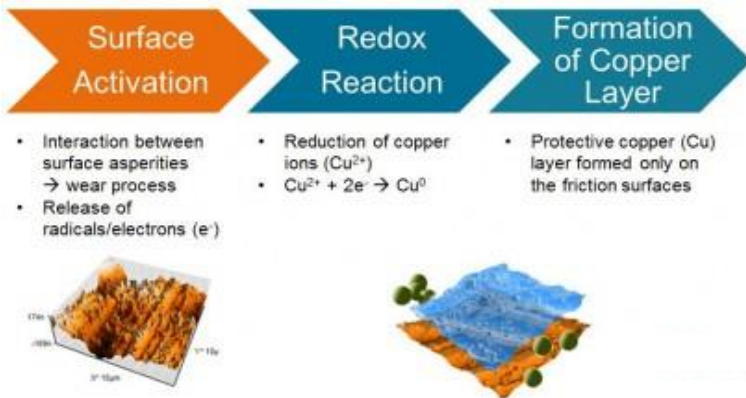
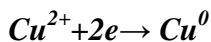


Рис. 5 . Механізм дії наноматеріалу NANOL [23]

Взаємодія між поверхневими нерівностями приводить до значних напружень, що викликає розкладання елементів, що входять до складу NANOL , в результаті чого утворюються вільні електрони. Далі відбувається відновлення іонів міді Cu^{2+} згідно реакції



та утворення захисного шару міді (рис.5), який утворюється лише у зоні контакту, тобто тільки на поверхнях тертя [23]. Мідна металева плівка захищає зони тертя від зносу, знижує робочу температуру вузлів тертя та подовжує термін служби машин і компонентів [22].

Зпатентована технологія також підвищує ефективність ДВЗ, покращує екологічні параметри та підвищує ефективність промислових застосувань із сильним тертям і високими температурами. Особливу увагу слід приділити продукту «Nanol Power+ МН/ML» [24], який був спеціально розроблений для застосування у морській сфері та на морському транспорті, зокрема для суднових ДВЗ, які працюють на важкому паливі з великим показником сірки (МН – highsulphur) та низькосірчастому пальному (ML – lowsulphur).

Центр «VTT Technical Research Center of Finland» у період з 2010 по 2017 роки провів [24] 16 натурних і 4 стендових випробування зі вмістом 0,3% NANOL у суднових моторних оливах і мастилах, та 15 лабораторних трибовипробувань з вмістом 0,3% ~ 3% NANOL в мастилі. У суднових натурних випробуваннях спостерігалось зниження витрати палива на 4% для дизельних двигунів середньої потужності (1600 ~ 10000 кВт), і – на 1~2% для великих (12600 ~ 15600 кВт) двигунів. Стендові випробування [24] в одиничних спостереженнях показали зниження тертя на 4%, зниження витрати палива до 3% і збільшення крутного моменту та потужності на 1% в дизельних двигунах різного типорозміру (60 ~ 4000 кВт) при використанні присадки «NanolPower+ МН/ML».

Центр «Schaeffler Group» випробував на машині FE8-25 [25] ролікові підшипник з метою оцінки впливу NANOL на утворення білих поверхневих тріщин (БПТ). Доведено, що поява БПТ спостерігалась, після часу випробування $t > 422$ годин, в той час, як для традиційних присадок утворення БПТ відбулося вже у проміжку від 30 до 42 годин. Отже, мастило з присадкою NANOL досягло щонайменше десятикратного збільшення терміну служби в порівнянні з іншим еталонним мастилом в умовах змішаного тертя.

Судноплавна компанія «Transfennica Ltd.» повідомляє [23], що випробування, проведені компанією «Napa Ltd.» під наглядом Регістру судноплавства «Lloyds Register» на судні M/V «Seagard» (з головним двигуном Wärtsilä 16V46B, MCR-потужність якого становила 15600 кВт), показали, що при використанні продукту NANOL споживання палива скоротилося в середньому на 2%.

Судноплавна компанія – «BoreLtd.» (експлуатує судна типу "Ро-Ро", а саме «Ro-Flex», «Ro-Ro» та «CarCarrier»), звітує [25], що у двигунах суден компанії загальна витрата палива була знижена приблизно на 4% за перші 12 місяців використання продукту NANOL.

При застосуванні отримані наступні результати:

- зменшення витрат палива до 6%;
- зменшення шкідливих викидів у атмосферу до 30%;
- зменшення показників тертя до 30%;
- зменшення зносу та задирів на поверхні циліндрів до 10%;
- збільшення терміну роботи підшипників кочення.

4. Особливості механізму дії наноматеріалів

Наведемо аргументи, які дають підстави пояснення ефективної дії наноматеріалів у порівняння з традиційними присадками мікронних розмірів.

Оцінимо надлишкову поверхневу енергію зразка масою $m = 1$ г утвореного сферичними наночастинками розміром $r = 10$ нм. Прийmemo середнє значення густини $\rho = 4 \cdot 10^3$ кг/м³, тоді об'єм даної маси $V = m/\rho = 2,5 \cdot 10^{-7}$ м³, об'єм наночастинки $V_0 = 4\pi r^3/3 = 4,2 \cdot 10^{-24}$ м³ та її поверхня $S_0 = 4\pi r^2 = 1,26 \cdot 10^{-15}$ м². Загальна кількість частинок $N = V/V_0 = 6 \cdot 10^{16}$, а їх сумарна площа поверхні $S = S_0 N = 75$ м² та сумарна поверхнева енергія $W = \sigma S = 7,5$ Дж, де взяли для питомої поверхневої енергії характерне значення $\sigma \sim 0,1$ Дж/м².

Отже 1 г наночастинок має характерне значення сумарної поверхні 10-100 м² та характерне значення надлишкової поверхневої енергії $\sim 1-10$ Дж. Отримані результати на 2-3 порядки більші, ніж для частинок мікронних розмірів, отже наночастинки знаходяться у нерівноважному стані..

Щоб описувати процеси, які протікають в нерівноважних системах вводять поняття відкритої системи, де зміна ентропії складається з двох внесків [25]

$$dS = dS_V + dS_S,$$

де $dS_V > 0$ є приріст ентропії в системі за рахунок процесів, які протікають, та dS_S – потік ентропії, обумовлений обміном енергією або речовиною з оточуючим середовищем і цей доданок не має певного знаку. В такій відкритій системі, яку називають "активним елементом", можливий такий перерозподіл енергії між її елементами, при якому система переходить в стан з меншою ентропією, тобто

$$dS = dS_V + dS_S < 0.$$

Тобто, у відкритих термодинамічних системах при по мірі збільшення відхилення від рівноважного стану, як показав Пригожин [25], термодинамічна система губить стійкість, а малі флуктуації можуть привести до процесів самоорганізації – у результаті якого відбувається перехід від хаотичного руху до впорядкованого систему зі створення нових просторових та часових структур, які не виникають поблизу рівноважного стану.

Так, при введенні наноматеріалів у мастильний матеріал у парах тертя досягаються високі напруження та градієнти температур, що створює суттєві відхилення від рівноваги у нерівноважній системі, якою є наноматеріал. У цих місцях можуть виникати перетворення зі зменшенням ентропії, які приводять до виникнення порядку в системі, як прагнення системи знизити ентропію шляхом самоорганізації наночастинки, що пояснює, чому відбувається утворення міцної та зносостійкої плакувальної плівки, які суттєво збільшують ресурс пар тертя [26].

Друга причина – це особливість поведінки поверхневих атомів при контакті з металічною поверхнею, де можливе тунелювання електронів через бар'єр між наночастинкою і поверхнею та перехід електронів на вакансії. Доля атомів, що знаходяться на поверхні сферичної частинки діаметром d до загальної кількості атомів у об'ємі частинки складає [27] $\Delta N/N \approx 6\delta/dN$, де δ – товщина поверхневого шару частинки, яка складає 3-4 моношари часток і має величину $\sim 0,5$ нм. Тоді у сферичної частинки розмірі 10 нм, частка поверхневих атомів велика та складає 30%.

Електронні властивості атомів описуються квантово-механічним методом молекулярних орбіталей $\Psi_{(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_k)}$, які отримують [28] шляхом комбінацій атомних хвильових функцій

$$\Psi_{(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_k)} = \prod_{i=1}^k \Psi_{(\vec{r}_i)}, \text{ правити}$$

які є розв'язком стаціонарного рівняння Шрьодінгера [10]

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2 \psi_{(x,y,z)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_{(x,y,z)}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi_{(x,y,z)}}{\partial z^2} \right) + u_{(x,y,z)} \psi_{(x,y,z)} = E \psi_{(x,y,z)}$$

де E – енергія частинки, $u_{(x,y,z)}$ – потенціальна енергія в якій знаходиться частинка.

Положення поверхневих атомів відмінні від об'ємних за рахунок ненасичених електронних зв'язків у порівнянні з атомами в об'ємі наночастинки. Тому у разі контакту наночастинки з металічною по-

верхню орбіталі можуть виступати за межі об'єкта та здійснювати зв'язок з оточенням. За рахунок взаємодії з оточенням орбіталі деформуються, що змінює їх енергію і коли енергія взаємодії досягає рівня Фермі [28] електрони переходить на поверхню металу при контакті з ним. В результаті чого виникає кулонівська взаємодія між наночастинкою та металом, що зумовлює дії сил притягання та утворення конфігурації з сильним ковалентним або іонними зв'язком [28].

Крім зазначеного, виникнення кулонівської взаємодії наночастинок з металічною поверхнею, можливе за рахунок тунелювання електронів з поверхневих атомів. Ймовірність електрона, енергія якого E , проникнути в область $[x_1, x_2]$, де значення потенціальної енергії $u(x) > E$, визначається з виразу [10]

$$w = D = D_0 \cdot \exp \left[-\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m(u(x) - E)} \cdot dx \right],$$

де вісь x спрямована по нормалі до поверхні.

Оскільки при $E < u$ отримуємо $w > 0$, тобто електрон має шанс пройти через бар'єр, коли його енергія менша максимальної потенціальної, тому процеси тунелювання електронів з наночастинок до пар тертя цілком ймовірні.

Велика доля поверхневих атомів, нерівноважність наночастинок та кватновий характер руху атомів дає можливість пояснити ефективну взаємодію нанорозмірних матеріалів з металевими поверхнями.

Висновки

Аналіз експериментальних досліджень підтверджує, що наноматеріали ХАДО, Nano Vit Motor Renovator та NANOL відіграють значну роль у покращенні експлуатаційних характеристик суднових механізмів. Нанорозмірні частинки, що входять до наноматеріалів, мають енергетичну нерівноважність і в результаті самоорганізації при взаємодії з поверхнями деталей відбувається утворення захисної плакувальної плівки. Утворена плівка має високу контактну міцність і пластичність, гарну теплопровідність і знижує коефіцієнт тертя та зношування і захищає поверхні від схоплювання і зварювання.

Застосування розглянутих наноматеріалів у мастилах на морському транспорті діє протягом тривалого проміжку часу та дає наступні переваги:

- утворюють захисну трибоплівку на поверхнях тертя та у зонах контакту;

- сприяють суттєвому зменшенню зменшують тертя та зносу;
- суттєво підвищують несучу здатність мастил та збільшення часу їх дії;
- сприяють розсіюванню надлишкового тепла, знижуючи робочі температури та термічне навантаження на суднові деталі;
- подовжують термін служби судових двигунів і механізмів;
- підвищують показники енергоефективності та економічності СДВЗ;
- сприяють покращенню показників економії палива і мастила та зниженню викидів шкідливих речовин у атмосферу.

Саме тому розглянуті наноматеріали, як писадки до мастил та палив, є сучасною перспективою та дієвою альтернативою до вже існуючих. А їх механізм дії можна пояснити у рамках самоорганізації та квантовомеханічної поведінки наночастинок.

Перелік використаних джерел

1. Poole Charls. Introduction to nanotechnology/ Ch. Poole, F. OutsenLondon: John Wiley & Sons, 2003. 336 p.
2. Kumar Phany. Principles of Nanotechnology /Ph. Kumar//2Nd.Edish, ScitechPublications, 2020. 115 p.
3. Kozytskyi S. V. Properties and behavior of nanoparticles / S. V. Kozytskyi, S. V. Kiriiian. // Фізика аеродисперсних систем. – 2022. – №44. – С. 17–30].
4. Козицький С. В. Особливості дії наночастинок / С. В. Козицький, С. В. Кіріян. // Матеріали наук.-техн. конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт». – Одеса, 2019. – С. 49–52
5. Kozytskyi S. V. Effectiveness of nanomaterial utilizationin ship’s mechanisms / S. V. Kozytskyi, S. V. Kiriiian. // Суднові енергетичні установки. – 2019. – №39. – С. 101–106
6. Козицький С.В., Мікро-, мезо- та нанорозмірні кристали сульфїду цинку отримані методом високотемпературного синтезу, що само поширюється/ Фізика аеродисперсних систем. – 2023 – № 61. – С.32-42
7. Наноматеріали і нанотехнології / Азаренков М. О., Неклюдов І. М. та інші. – ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2014. – 316 с.
8. Valiulis A. A history of materialsand technologies development / A.Valiulis. – Technika, 2014. – 444 p.

9. Сугаков В. Й. Синергетика / В.Й. Сугаков //Київ, Обегіг, 2001. – 287 с.

10.Глауберман А. Ю. Квантова механіка / А. Ю. Глауберман. 2 видання// Одеса: Астропринт, 2017. – 526 с.

11.Козицький, С. В. Властивості нанооструктурованих матеріалів / С. В. Козицький, С. В. Кіріян // Суднові енергетичні установки. – 2022. – №45. – С. 123-133.

12.Козицький, С. В. Застосування наночастинок для збільшення ефективності суднових механізмів/ С. В. Козицький,Кіріян С. В. // Суднові енергетичні установки. – 2023. – №46. – С.53-66.

13.XADO Industrial: Revitalizants, oils, greases. Коддоступу: [https://xadoindustrial.com/image/data/download/XADO Industry](https://xadoindustrial.com/image/data/download/XADO%20Industry)

14.Стадниченко В. Н., Об образовании и функционировании металлокерамического покрытия полученного с помощью ревитализантов /В. Н. Стадниченко, Н. Г. Стадниченко, Р. Н. Джус, О. Н. Трошин // Вестн. науки и техн.: ХДНТ и НТУ «ХПИ». — 2004. — Вып. 1(16). — С. 18-27

15.Трошин О. Н. Наукова парадигма досягнення аномально низького тертя в трибології / О. Н. Трошин // Вісник ХНТУСГ. Вип. 184, 2017. С. 102-110

16.Nano Vit Research GmbH [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.nanovit-research.de/ueber-nanovit>.

17.Nanovit: General presentation. –Режим доступу до ресурсу: [http://efficiencytechnologies.co.uk/downloads // Tribo Presentation.pdf](http://efficiencytechnologies.co.uk/downloads//Tribo%20Presentation.pdf)

18.NanoVit Research GmbH [https://www.nanovit.de/ Neue MöglichkeitendurchEinsatz von NanoVit®–Download](https://www.nanovit.de/NeueMoglichkeitendurchEinsatzvonNanoVit-Download)

19.NanoVit Research GmbH [https://www.nanovit.de/ Der Einsatz von NanoVit® in Schmierfetten und -pasten–Download](https://www.nanovit.de/DerEinsatzvonNanoVit-inSchmierfettenund-pasten-Download)

20.NanoVitResearch GmbH [https:// www.nanovit.de/ NanoVit® in-Diesel- Verbrennungsmotoren – Download](https://www.nanovit.de/NanoVit-in-Diesel-Verbrennungsmotoren-Download)

21. Lubricant oil additives. Nanol Technology – <https://www.nanol.eu>

22. Nanol Technology. – Access mode: [https://nanol.eu/technology Fighting friction with chemistry and innovation.htm](https://nanol.eu/technologyFightingfrictionwithchemistryandinnovation.htm).

23. Nanol References [Electronic resource].–Access mode: <https://nanol.eu/references/>.

24. Nanol Power+ [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.nplube.com/nanol>.

25. Николис Г. Самоорганизация в неравновесных системах / Г. Николис, И. Пригожин. - М: Мир, 1979. – 512 с.

26. Козицький С.В. Особливості поведінки наноматеріалів/Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт». – Одеса, 2022. с.49-52

27. Козицький С. В., Кіріян С. В. Особливості дії наночастинок / Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річко вий флот: експлуатація і ремонт». – Одеса, 2019. с.49-52

28. Поплавко Ю. М. Фізика твердого тіла. Том 1: Структура, квазі частинки, метали, магнетики:– Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – 415 с.