

10.31653/smf46.2023. 53-66

Козицький С. В., *Кіріян С. В.

Національний університет “Одеська морська академія”

*Технологічний Інститут Британської Колумбії, Ванкувер, Канада

ЗАСТОСУВАННЯ НАНОЧАСТИНОК ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ МЕХАНІЗМІВ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Розвиток матеріалознавства в двадцять першому столітті спрямовано на отримання матеріалів з особливими властивостями, які вивчаються на молекулярному рівні при дослідженні характеристик макрооб'єктів. Ця область науки і техніки має назву нанотехнологія [1].

У діапазоні розмірів 1 -100 нанометрів (10^{-9} - 10^{-7} м) виникає новий світ, в якому суттєво змінюються фізичні та хімічні властивості будь-яких речовин, і де сходяться предмети дослідження різних галузей наук.

Аналіз досліджень та публікацій. Особливості поведінки нанорозмірних частинок не можуть бути описані в рамках класичної фізики та фізики рівноважних процесів [2]. Це пов'язано з розмірами наночастинок (НЧ), що приводить до великої долі поверхневих атомів (при розмірі сферичної частинки 10 нм, частка поверхневих атомів складає 30% [3]), надлишку поверхневої енергії (у 1 г речовини з НЧ зазначеного розміру її значення сягає 5-10Дж [2, 4]) та прояву квантовомеханічного характеру поведінки [2].

Суттєва нерівноважність НЧ, яка зумовлена як методами отримання [2, 5] так і надлишковою поверхневою енергією [4], вимагає для пояснення особливостей їх поведінки застосовувати [2, 4] нерівноважну термодинаміку [6], а особливість руху таких мікроскопічних об'єктів – квантову механіку [7].

НЧ надають зробленим з них матеріалам абсолютно нові властивості і поведінку [1, 5]. Для усіх НЧ спостерігається [8] зміна фундаментальних фізичних параметрів: істотне зниження температури плавлення, збільшення міцності, одночасне зростання міцності та пластичності [9]. У порівнянні з традиційними матеріалами наноматеріали (НМ) характеризуються підвищеною твердістю в 2...7 разів, межею міцності в 1,5...8 разів, межею плинності в 2...3 рази [1, 4].

Постановка завдання. При експлуатації суднових механізмів виникає велика кількість проблем, які вимагають ефективного вирішення. Серед основних зазначимо: збільшення ресурсу суднових механізмів; збільшення ККД механізмів і захист довкілля від викидів.

В роботі розглядаються питання перспективи використання НЧ та НМ з метою ефективного вирішення зазначених вище проблем.

Виклад основного матеріалу.

Розмірності наночастинок.

Особливість наночастинок полягає в тому, що вони можуть існувати з різною розмірністю [5, 9]. Продемонструємо це на прикладі наноалмазів.

Точкові - 0D - мірні (фулерени рис. 1, а) – це нанокластери, які мають форму близьку до кулі $r \sim 1$ нм і утворені 12 пентагональними і 20 гексагональними симетрично розташованими осередками. Фулерени можуть з'єднуватися один з одним в твердому тілі та утворювати гранецентровану кристалічну ґратку суттєво збільшуючи як міцність, так і пластичність.

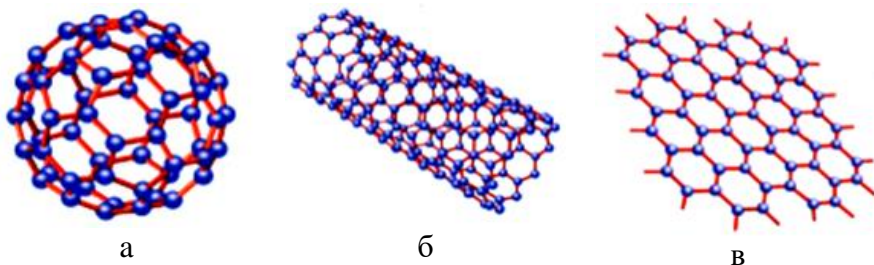


Рис.1. Три форми існування вуглецевих наноматеріалів різної розмірності: (а) фулерени C_{60} , (б) вуглецеві нанотрубки, (в) листи графену [8]

1D-мірні: нанострижні, нанотрубки (рис. 2, б). Для усіх багатошарових нанотрубок характерне значення відстані між сусідніми графеновими шарами близьке до величини 0,34 нм. Діаметр одношарових та багатошарових нанотрубок лежить в межах від одного до декількох десятків нанометрів, а довжина досягає кількох міліметрів. В даний час подібні структури отримані не лише з вуглецю, але з нітриду бору, карбїду кремнію, оксидів перехідних металів і деяких інших сполук.

Вуглецеві нанотрубки дуже міцні. Модуль Юнга вуглецевих нанотрубок змінюється від 1280 до 1800 ГПа, для сталі він 210 ГПа. Вони не ламаються при вигині, оскільки стінки трубки утворені правильними шестикутниками, які при вигині деформуються, але не руйнуються. Характерною властивістю геометрії нанотрубок є значення їх питомої поверхні (в середньому $\sim 1600 \text{ м}^2/\text{г}$ для одностінних трубок) і відношення довжини до діаметра (10^7 і вище).

Плоскі 2D-мірні (графен рис. 1, в): двовимірний атомний кристал розміром $l \sim 10 - 100 \text{ нм}$, що складається з атомів вуглецю збудованих у гексагональну решітку, що є плоскою сіткою з правильними однаковими шестикутними осередками. Графен гнучкий, еластичний, стабільний при кімнатній температурі, володіє високою теплопровідністю та електропровідністю. Це один з найміцніших у світі матеріалів, який у 100 разів перевершує міцність сталі.

Надзвичайно висока рухливість електронів у ньому робить графен перспективним матеріалом для використання у наноелектроніці як заміна кремнію в інтегральних мікросхемах.

Графен може виступати в якості надпровідника, а це означає, що електричний струм може проходити через нього з нульовим опором.

Нанесена плівка графена і робить поверхню деталі надміцною, тобто безмежно довгою при використанні.

Об'ємні 3D - мірні наноструктури на поверхні або в об'ємі матриці (рис. 2): їх характерний розмір $r \sim 10-100 \text{ нм}$.

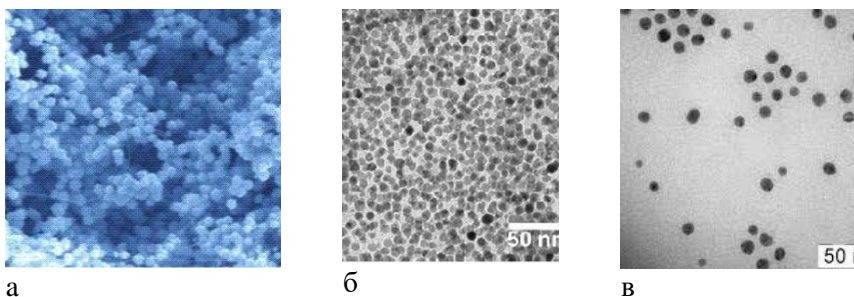


Рис. 2. Світлинні НЧ отриманих з електронного мікроскопу при збільшенні $\times 30000$: (а) нікелю $d_{cp} = 10 \text{ нм}$; (б) заліза $d_{cp} = 8 \text{ нм}$; (в) срібла $d_{cp} = 20 \text{ нм}$ [9]

Зауважимо, що структура фулеренів, нанотрубок та графенів може бути як одношаровою, що зображено на рис. 1, так і багатшаровою.

Механізм дії наноматеріалів.

За останні кілька десятиліть дослідники виявили різні механізми, що пояснюють причини розвитку покращеного змащування. Механізм дії визначається рядом факторів: розміром наночастинок, їх формою, відносною твердістю у порівнянні з покриттям тощо.

Форма НЧ, які використовуються у присадках до мастил і змащувальних матеріалів, є важливим параметром, який впливає на їх ефективність, оскільки безпосередньо визначає тиск, який зазнають НЧ при навантаженні. Наприклад, при якомусь заданому навантаженні найбільший тиск відчують саме НЧ сферичної форми (фулерени), менший – у випадку лінійного контакту (нанотрубки), а найменший – нанолисти (графени), тому що в той час як наносфери здійснюють точковий контакт з поверхнею, нанотрубки – лінійний, а нанопластинки здійснюють плоский контакт (рис. 3). Таким чином, при заданому навантаженні НЧ форми листа мають найменшу ймовірність бути «втиснутими» у поверхню та найменшу ймовірність призвести до деформації поверхонь тертя.



Рис. 3. Відображення впливу форми НЧ на їхню поведінку і властивості в зоні контакту поверхонь тертя під навантаженням [10]

Наведемо основні механізми взаємодії наночастинок з парами тертя [10]. Процес згладжування зводиться до того, що наночастинок неорганічних матеріалів запобігають утворенню зварних швів між поверхнями зсуву шляхом переносу матеріалу наночастинок на зсувні поверхні (рис. 4).

Таке «штучне згладжування» призведе до поліпшення трибологічних властивостей, в першу чергу завдяки зменшенню шорсткості поверхні.

Процес формування трибоплівки (утворення плакувальної плівки) полягає у тому, що в граничних умовах змащення наноча-

стинки, дисперговані у мастильний матеріал, можуть вбудовуватися у матеріал пар тертя [11,12], утворюючи захисну плівку на поверхнях, що труться (рис. 5).

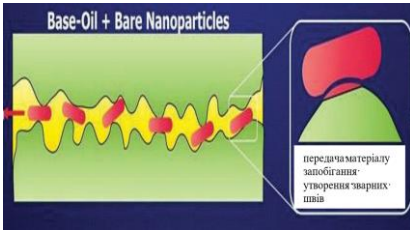


Рис. 4. Ілюстрація процесу згладжування наночастинками [10]

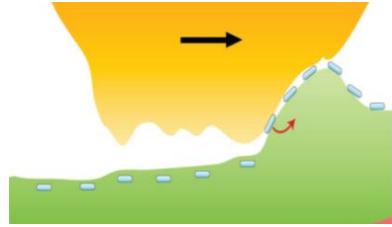


Рис. 5. Схема вбудовування твердих наночастинок у покриття [10]

Утворена з наночастинок плівка володіє унікальними властивостями: вона має велику міцність і одночасно велику пластичність, гарну теплопровідність, збільшує фактичну площу контакту, знижує коефіцієнт тертя й зношування, захищає поверхні від схоплювання [10]. Як відомо, поєднання міцності і пластичності, що проявляється лише для НМ, є необхідною умовою для збільшення ресурсу пар тертя.

Механізм дії кулькового ефекту (рис. 6) при застосуванні НЧ виникає, коли вони мають сферичну або квазісферичну форму.

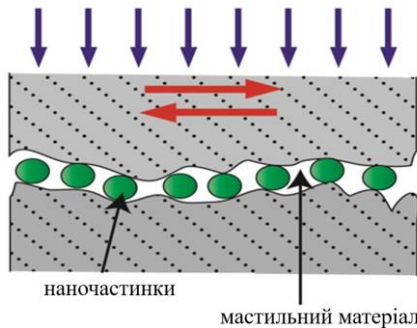


Рис. 6. Ілюстрація кулькового механізму [13]

Сферичні наноматеріали сприяють коченню вздовж поверхні зношування та перетворюють чистий ковзний рух у комбінацію руху ковзання-кочення [13, 14] за умови, що їх розмір перевищує шорсткість поверхні (рис. 6). Для того щоб цей механізм мав місце,

потрібно підтримувати умови низького навантаження між тертям поверхонь, щоб зберегти форму і жорсткість наночастинок.

Якщо НЧ сферичної форми багатoshарові (цибулеподібні), то дослідження механізму тертя таких фулереноподібних наночастинок за допомогою електронної мікроскопії високої роздільної здатності показало [14], що в залежності від навантаження виникають наступні механізми тертя наночастинок: кочення, ковзання та відшаровування (рис. 7).

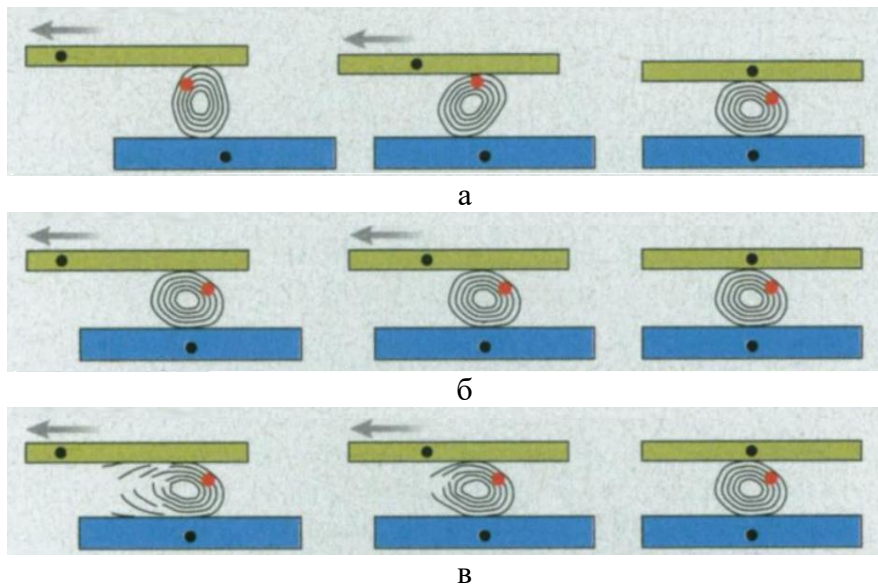


Рис. 7. Три механізми тертя багатoshарової НЧ WS_2 [15]:
(а) кочення, (б) ковзання, (в) відшаровування.

Нижня поверхня пари нерухома, верхня рухається ліворуч.

Концентрація наночастинок.

Добавки НЧ до базового мастильного матеріалу суттєво впливають на трибологічні властивості мастильних систем [12]. Існує оптимальна концентрація, при якій коефіцієнт тертя досягає мінімуму і вважається, що це виникає коли площа НЧ покриває контактуючі поверхні. Оскільки площа поверхні одного граму частинок розміром 10-15 нм складає величину 100-200 квадратних метрів в залежності від матеріалу наночастинок [4], стає зрозумілим чому присадки на-

ночастинок на 1-2 порядки менші, ніж присадки мікронних матеріалів, що використовуються для аналогічних цілей.

Коли концентрація наночастинок занадто низька, покриття наночастинками може бути недостатнім для запобігання зачеплення поверхонь у місцях контакту, однак, коли концентрація наночастинок занадто висока, тоді можлива їх агрегація, при якій утворюються великі скупчення, які можуть діяти як абразивні тіла [12].

Зменшення тертя та зношування при застосуванні НЧ.

Зменшення тертя та зносу має важливе значення для підвищення енергоефективності та надійності механічних систем. Дослідження антифрикційних та протизношувальних властивостей НЧ оксиду 4-валентного титану (IV) – TiO_2 , розміром від 18 до 21 нм, на кульках сталі довели [16], що ефективність присадки починає діяти з концентрації 0,025% за масою. При температурі 23°C спостерігається зниження середнього значення коефіцієнта тертя з 0,15 до 0,05 в діапазоні зміни концентрації присадки від 0,01% до 0,075% за масою НЧ TiO_2 , а при температурі 75°C ще більше зниження коефіцієнта тертя з 0,095 до 0,015 в діапазоні від 0,01% до 0,075% вмісту TiO_2 за масою. При подальшому збільшенні концентрації присадки покращення не спостерігалось [17]. Результати проведених досліджень зображені на рис. 8.

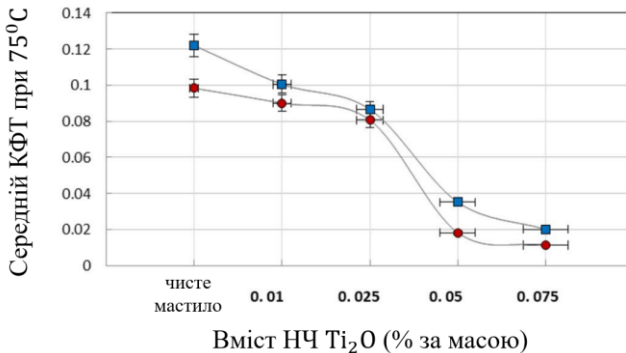


Рис. 8. Середній коефіцієнт тертя (КФТ) для різної кількості присадки НЧ TiO_2 при температурі 75°C [16]

Було виявлено [16], що суспензія мастильного матеріалу, що містить TiO_2 , підвищує здатність витримувати навантаження до 35% порівняно з базовим мастилом. Крім того, для похідної цієї суспензії

також було виявлено зниження шорсткості поверхні до 81%, зниження коефіцієнта тертя на 15% та зменшення рубців зносу на 11%.

Розроблено [18] спеціальний склад із суміші порошків на основі нанотехнологій, внесення якого в мастило редукторів сприяє утворенню на поверхні деталі молекулярного шару, який знижує коефіцієнт тертя до значень 0,003-0,007, а твердість цього покриття становить HRC-70 та температура плавлення 1582°C.

Було виявлено [19], що суспензія мастильного матеріалу, яка містить наночастинки Al_2O_3 та TiO_2 , найбільш ефективно (до 50%) знизилася зношування в умовах граничного та змішаного змащування, тобто в області ВМТ та НМТ, та до 30% знизилася швидкість зношування поршневих кілець.

Процесами самоорганізації [2] можна пояснити експериментальні дані по утворенню зносостійкого покриття при використанні наноприсадок Al_2O_3 до мастильних матеріалів [20]. На рис. 9 наведені результати випробувань на реальному двигуні при високих навантаженнях підшипника: вгорі підшипник, який експлуатувався 1000 годин з використанням стандартних присадок до мастильного матеріалу мікронних розмірів, а внизу такий самий підшипник при експлуатації протягом 6000 годин з використанням присадки 30 мг нанопорошку оксиду алюмінію на 1 літр мастильного матеріалу.

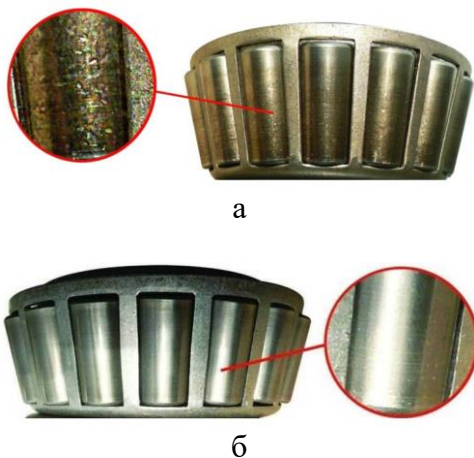


Рис. 9. Зношування підшипників кочення: (а) після 1000 годин експлуатації, (б) з використанням нанопорошку Al_2O_3 після 6000 годин експлуатації

Ефект зменшення зношування на порядок зумовлений зміною механізму взаємодії наноприсадок з сувними поверхнями у порівнянні з механізмом дії традиційних присадок мікронних розмірів.

Дослідження виконані авторами [21, 22] встановили, що нанопорошок оксиду алюмінію Al_2O_3 , що вводиться в систему змащення двигуна, збільшує термін служби мастила та зменшує швидкість зносу компонентів шляхом формування трибошару на поверхнях тертя. Нерівноважність нанопорошків викликає процеси самоорганізації при взаємодії між нанодобавками та поверхнями тертя [24], в результаті чого утворюються трибопокриття з чудовою контактною міцністю, підвищеною пластичністю та хорошою теплопровідністю.

Експериментальне дослідження зношення на плоскій поверхні [24] проведене з використанням синтетичного базового поліальфаолефіну (ПАО) та його суміші з Al_2O_3 показало значне зменшення зносу поверхонь, що взаємодіють – суттєве зменшення утвореної плями контакту (рис. 10).

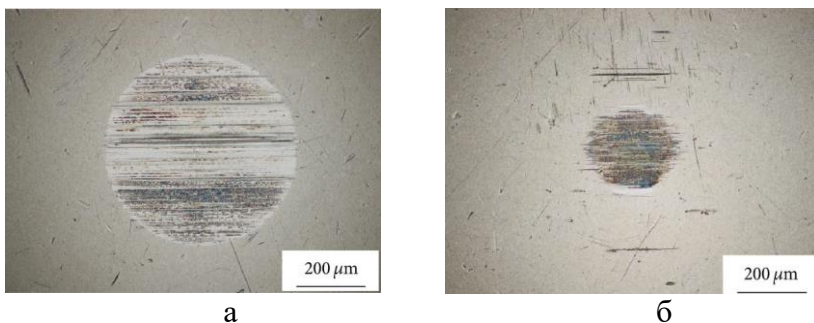


Рис. 10. Оптичні мікрофотографії рубців на поверхні:
(а) ПАО, (б) ПАО + nano Al_2O_3 [24]

Полікристали дисульфіді молібдену мікронного розміру широко застосовувалися як тверде мастило і присадка до мастил завдяки своїй шаруватій структурі: в шарі діє сильний іонно-ковалентний зв'язок, а між шарами – слабкі сили Ван-дер-Ваальса. У наноструктурному виді дисульфід молібдену як і дисульфід вольфраму утворюють фулереноподібні структури та широко вивчались як мастильні добавки [25] оскільки чудово зменшують коефіцієнт тертя до 0,05-0,06 при високих контактних тисках, що пояснюється їх стабільністю

(Табл. 1). Зменшення тертя, яке здійснюється за допомогою мастильних добавок MoS_2 та WS_2 є найбільш вираженим.

Таблиця 1. Ефективність фулереноподібних наномастильних матеріалів

Компонента	Діаметр (Нм)	Концентрація вг. %	Розчин	Коефіцієнт тертя
MoS_2	8-20	0,2 вг. %	РАО	0,059
WS_2	100	1 вг. %	РАО	0,05

Дослідження показали, що нанопорошок дисульфиду молібдену може утворювати трибопокриття на взаємодіючих поверхнях [26, 27]. Сформовані плівки виявляють високу еластичність і пластичність в зоні контакту з робочим середовищем. Зносостійкість взаємодіючих поверхонь підвищується від 4 до 20 разів (залежно від умов експлуатації) порівняно з кристалами MoS_2 мікророзміру за рахунок фізичної адсорбції частинок MoS_2 , викликаної силами Ван-дер-Ваальса, а також за рахунок механічної імплантації нанорозмірних кристалів MoS_2 в металеві поверхні з утворенням покриттів товщиною 4 нм.

Нові наномастильні матеріали із додаванням багат шарового графену (MLG) та багат шарового графену просоченого міддю (MLG-Cu) [28] успішно застосовуються у автомобільних ДВЗ. Властивості таких мастил вимірювали при масовій концентрації присадки 0,5% та температурі 100 °С і було виявлено значне зниження коефіцієнта тертя до 43% та зносу 63% у випадку моторного мастила з графеном, просоченим міддю. Склади MLG, MLG-Cu не показали жодного осаду при диспергуванні в моторному маслі навіть через три місяці після виробництва.

У дослідженні авторів [29] вивчалися протизносні властивості моторного мастила SAE-20W50, що містить сферичні наночастинки фулерену, вуглецеві нанокіульки та нанотрубки оксиду ванадію. Три види випробувань на знос, у тому числі випробування чотирма кульками, випробування штифтом на диску та триботест двигуна, проводилися на базовому мастилі та наномастильних матеріалах, які були виготовлені з концентрацією 0,1% маси.

Результати досліджень показали зниження швидкості зношування наномастильних матеріалів на 5-15% та якість поверхні підшипників у наномастильних матеріалах значно покращилися порівняно з базовим мастилом.

Вплив наночастинок на теплофізичні параметри нанофлюїдів.

Додавання наночастинок Al_2O_3 до рідин сприяє зміні їх теплофізичних властивостей, перш за все – покращенню теплопровідності [30]. Збільшення інтенсивності тепловіддачі при кипінні робочих тіл холодильних машин в присутності в них наночастинок показано в роботі [31] та пояснюється в основному модифікацією поверхні теплообміну наночастинками, а не їх впливом на теплофізичні властивості.

Зниження втрат на тертя у компресорі при додаванні до холодильних компресорних мастил фулерена C_{60} показано у дослідженні [32], де експериментально доведено зниження енергоспоживання компресором холодильної машини при практично незмінній холодопродуктивності та зниження питомої ізобарної теплоємності і таке зниження зростає зі збільшенням концентрації наночастинок. Такий результат буде сприяти зниженню енергоспоживання холодильною машиною без її модернізації за рахунок впровадження компресорних “нано-мастил”.

Висновки.

Аналіз експериментальних досліджень підтверджує, що основними методами збільшення ресурсу пар тертя є використання наночастинок шляхом присадок до змащувальних матеріалів.

Впровадження наночастинок збільшує ресурс пар тертя, покращує антифрикційні властивості мастильних матеріалів, зменшує коефіцієнт тертя і діаметр плями зносу.

В залежності від розмірності, форми та розмірів наночастинок проявляють різні механізми та поведінку в зоні контакту поверхонь тертя, суттєво збільшуючи ресурс та зменшуючи енергоємність механізмів.

Наукові розробки по нанотехнології широко впроваджуються у військову та автомобільну техніку, і є надія, що черга дійде і до суднової техніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ch. Pul and F. Outsen. Introduction to nanotechnology. London: John Wiley & Sons, 2003. 336 p.

2. Kozytzkyi S. V. Properties and behavior of nanoparticles / S. V. Kozytzkyi, S. V. Kiriiian. // Фізика аеродисперсних систем. – 2022. – №60. – С. 17–30.

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

4. Kozytyskiy S. V. Effectiveness of nanomaterial utilization in ship's mechanisms / S. V. Kozytyskiy, S. V. Kiriiian. // *Суднові енергетичні установки*. – 2019. – №39. – С. 101–106.

5 *Наноматеріали і нанотехнології* / Азаренков М. О., Неклюдов І. М. та інші. – ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2014. – 316 с.

6. Сугаков В. Й. *Основи синергетики* / В.Й Сугаков – К.:Обереги. 287с.

7. Глауберман А. Ю. *Квантова механіка* / А. Ю. Глауберман. – Одеса: Астропринт, 2017. – 526 с. – (2 видання).

8. Козицький С. В. Властивості наноструктурованих матеріалів / С. В. Козицький, С. В. Кіріян. // *Суднові енергетичні установки*. – 2022. – №45. – С. 123-133.

9. *Наноматеріали і нанотехнології: підруч. для студентів ВНЗ* / під заг. ред. В. О. Богуслаєва. – Запоріжжя: АТ "Мотор Січ", 2015. – 202 с.

10. Isosteric design of friction-reduction and anti-wear lubricant Iso-steric design of friction-reduction and anti-wear lubricant additives with less sulfur content additives with less sulfur content / G. Xinlei, L. Denghui, Z. Song, D. Kang. // *Friction*. – 2018. – №6. – С. 164–182.

11. Omrani E. Effect of Micro- and Nano-Sized Carbonous Solid Lubricants as Oil Additives in Nanofluid on Tribological Properties / Emad Omrani, Pradeep L. Menezes & Pradeep K. Rohatgi. *Journal Lubricants*, Volume 7, Issue 3, 2019 [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.3390/lubricants7030025>].

12. Bassem A. Tribological Properties of Nanoparticle-based Lubrication Systems / Bassem A. – Texas A&M University, 2013. – 181 p.

13 Dispersity, stability and tribology behavior of modified nanoserpentine in lubricating oil / [Y. Yan, X. Yan, C. Yang та ін.]. // *Industrial Lubrication and Tribology*. – 2022. – №74. – P. 698–705.

14. Akbulut M. Nanoparticle-Based Lubrication Systems [Електронний ресурс] / Mustafa Akbulut // *Powder Metallurgy & Mining*. – 2012. – Режим доступу до ресурсу: <http://dx.doi.org/10.4172/2168-9806.1000e101>.

15. Friction mechanism of individual multilayered nanoparticles / O.Tevet, P. Von-Huth, R. Popovitz-Biro, R. Tenne. // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2011. – №108. – С. 19901–19906.

16. Birleanu, C. «Effect of TiO₂ nanoparticles on the tribological properties of lubricating oil: an experimental investigation» / Corina Birleanu, Marius Pustan, Mircea Cioaza, Andreia Molea, Florin Popa & Glad Contiu. Journal «Scientific Reports», Volume 12, Article No: 5201, 2022 [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09245-2>.

17. Козицький С.В. Використання наночастинок оксиду титану (IV) – TiO₂ для покращення трибологічних властивостей змащувального мастила / С.В. Козицький, І.А. Дем'яненко. // Суднові енергетичні установки. – 2022. №45. – С. 134–144.

18. Сучасні аспекти трибології у транспортних засобах / В. А. Косенко, О. Г. Добровольський, Н. Ф. Кушевська, В. В. Малишев. – Київ: УН-Т "Україна", 2016. – 365 с.

19. M.K.A. Ali, H. Xianjun, L. Mai, C. Qingping, R.F. Turkson, C. Bicheng, Improving the tribological characteristics of piston ring assembly in automotive engines using Al₂O₃ and TiO₂ nanomaterials as nano-lubricant additives // Tribol. Int. 103, 540–554 (2016)

20. ТКАЧ О. П. Наноматеріали і нанотехнології в приладобудуванні / О. П. ТКАЧ. – Суми: СумДУ, 2014. – 127 с.

21. Improving the Tribological Characteristics of Piston Ring Assembly in Automotive Engines using Al₂O₃ and TiO₂ Nanomaterials as Nano-Lubricant Additives / M.Ali, H. Xianjun, R. F. Turkson, L. Mai. // Tribology International. – 2016. – №103. – С. 540–554.

22. Thakur A. Study of behaviour of aluminium oxide nanoparticles suspended in SAE20W40 oil under extreme pressure lubrication / A. Thakur, A. Thakre. // Industrial Lubrication and Tribology. – 2015. – №67. – С. 328–335.

23. Kozytskyi S.V. Self-organization of nano-sized metal-containing lubricant additives / S.V. Kozytskyi, S.V. Kiriiian // Суднові енергетичні установки. – 2022. – №44. – С. 10–27.

24. Experimental evaluation of oxide nanoparticles as friction and wear improvement additives in motor oil [Електронний ресурс] / N. Demas, A. Lorenzo-Martin, O. Ajayi, G. Fenske // Journal of Nanomaterials. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.1155/2017/8425782>.

25. Fullerene-like MoS₂ Nanoparticles and Their Tribological Behavior / R. Rosentsveig, A. Gorodnev, N. Feuerstein, H. Friedman. // *Tribology Letters*. – 2009. – №36. – С. 175–182.

26. Solid Lubrication with MoS₂: A Review. Lubricants [Електронний ресурс] / M. Vazirisereshk, A. Martini, D. Strubbe, M. Baykara. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mdpi.com/2075-4442/7/7/57>

27. Prabhakar Vattikuti S. V. Synthesis and Characterization of Molybdenum Disulfide Nanoflowers and Nanosheets: Nanotribology / S. V. Prabhakar Vattikuti, C. Byon // *Journal of Nanomaterials*. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.1155/2015/710462>.

28. Development of nanolubricant based on impregnated multilayer graphene for automotive applications: Analysis of tribological properties / [E. D. Ramón-Raygoza, C. I. Rivera-Solorio, E. Giménez-Torres та ін.]. // *Powder Technology*. – 2016. – №302. – С. 363–371.

29. Investigation of the anti-wear properties of nano additives on sliding bearings of internal combustion eng / E. Etefaghi, H. Ahmadi, A. Rashidi, S. Mohtasebi. // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. – 2013. – №14. – С. 805–809.

30. An influence of Al₂O₃ nanoparticles on the caloric properties and parameters of the phase transition of isopropyl alcohol in solid phase / V. Zhelezny, I. Motovoy, O. Khliyeva, N. Lukianov. // *Thermochimica Acta*. – 2019. – №671. – С. 170–180.

31. A new approach for predicting the pool boiling heat transfer coefficient of refrigerant R141b and its mixtures with surfactant and nanoparticles using experimental data / [O. Khliyeva, V. Zhelezny, T. Lukianov та ін.]. // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2020. – С. 2327–2339.

32. An experimental investigation of the influence of fullerene C₆₀ additives in compressor oil on the coefficient of performance of the refrigeration system / [V. Zhelezny, G. Chen, O. Khliyeva та ін.]. // *Proc. 25th IIR International Congress of Refrigeration*. Montreal, Canada. – 2019. – С. P. 1030–1037.