

doi: 10.32620/oikit.2022.96.04

УДК 621.4-24:620.3:539.92

В. Т. Сікульський, К. В. Майорова
Ю. А. Воробйов, О. М. Застела
В. В. Агарков*

Аналіз трибологічних наноматеріалів для підвищення зносостійкості і довговічності механічних контактуючих поверхонь деталей машин і механізмів на основі онтологічної системи підтримки прийняття рішень

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»*

** Державне підприємство «Харківський регіональний науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації»*

Об'єктом дослідження є трибологічні наноматеріали (ТНМ), які використовують для підвищення зносостійкості і довговічності механічних контактуючих поверхонь деталей машин і механізмів. Метою є створення систем підтримки прийняття рішень на основі онтологічної системи при виборі ТНМ. Виконано аналіз існуючих досліджень і публікацій з використання ТНМ, які присутні на ринку України та Європейських країн. Аналіз показав, що ТНМ класифікують за основними ознаками та призначенням поверхонь, що працюють на тертя. Встановлено, що використання ТНМ показує значний технічний та економічний ефект, оскільки збільшується строк експлуатації виробу, зменшується витрата палива за рахунок зменшення коефіцієнту тертя. Виявлено, що вагомою ознакою при виборі того чи іншого ТНМ має бути екологічність виробництва та їх використання на деталях машин і механізмів. Зазначено, що існує проблема з існування обґрунтованих класифікаторів ТНМ, оскільки їх формування відстає від динаміки науково-технічного прогресу. Обґрунтована доцільність використання онтологічної системи підтримки прийняття рішення (ОСППР) щодо вибору ТНМ для покращення якостей контактуючих поверхонь деталей машин і механізмів. Отримані такі результати. Згідно аналізу існуючих сучасних і актуальних ТНМ та їх характеристик встановлено технології з нанесення ТНМ: «КЕСОН» із заповненням мікро-западин на поверхнях тертя з утворенням антифрикційних, зносостійких та адгезійних плівок (покриття), а також технології з використання кондиціонерів металів «Fenom», «ER», «SR3», присадок «Militec-1», які продовжують ресурс експлуатації без капітального ремонту і реметалізаторів «Lubriform» і «Мегафорс» з ефектом «незношуваності». Встановлено, що головним недоліком таких ТНМ є забруднення навколишнього середовища, а саме: питної, ґрунтової та поверхневої води. Вирішенням екологічного питання можливо за рахунок використання наноалмазів як специфічного універсального нановуглецевого ТНМ, що має властивості розкладання шкідливих органічних хімікатів. Їх представниками є «Lubriform Diamond Run Ln», «Nanodiamond Green Run», наноприсадки «Fenom Nanodiamond Green Run» (на основі наноалмазів), «Fenom Old Chap» (на основі наночастинок бентоніту), «Renom Engine Nanoguard» (для моторних мастил) та «Renom Gear Nanoguard» (для трансмісійних мастил). Для полегшення вибору ТНМ з метою покращення якостей механічних контактуючих поверхонь деталей машин і механізмів запропоновано ОСППР. Висновки. Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: створено ОСППР, яка враховує ознаки та характеристики ТНМ за потребами замовника, що звужить діапазон пошуку та скоротить час на його вибір. Наведені матеріали можуть бути корисними при проведенні теоретичних і експериментальних досліджень з продовження ресурсу та експлуатації деталей машин і механізмів машинобудівної галузі.

Ключові слова: трибологічні наноматеріали; онтологічна система підтримки прийняття рішень; метаонтологія; класифікатор; контактуючі поверхні.

Вступ

За останні 20 років уявлення про процеси тертя механічних контактуючих поверхонь деталей машин і механізмів суттєво змінилися. Наразі для підвищення їх зносостійкості і довговічності використовують різноманітні ефективні способи, які формуються ще на етапах створення деталей. На основі досвіду і знань інженер повинен знайти оптимальні конструктивні рішення, правильно вибрати матеріал і визначити раціональні технологічні методи виготовлення і зміцнення деталей машин і механізмів. Складність проблеми, що розглядається, зумовила формування і створення самостійної науки про тертя, зношування, змащування та взаємодії поверхонь твердих тіл при їх відносному русі, а також пов'язаних із цим явищем наслідків – трибології [1]. Головною метою цієї науки є забезпечення заданих показників надійності, геометричної точності і довговічності машин і механізмів за рахунок вирішення проблем і питань тертя, змащування, зношення поверхонь деталей і робочих органів, які перебувають між собою в дуже складних кореляційних залежностях.

На сьогодні сучасні технології виробництва дозволяють гарантувати раціональне проектування з помірними коефіцієнтами запасу міцності, а також мінімізувати витрати при виробництві і експлуатації виробу. Так при підвищенні довговічності деталей машин скорочуються витрати на запасні частини і матеріали для їх виготовлення, зменшується кількість персоналу і трудомісткість робіт при експлуатації, технічному обслуговуванні та ремонті. Збільшення терміну служби машин рівноцінне збільшенню їх випуску на тих же виробничих площадках. Вирішуючи завдання підвищення надійності і довговічності машин, тим самим опосередковано збільшуються виробничі потужності машинобудівних підприємств.

В останні роки досягнуто значних успіхів у створенні нових трибологічних матеріалів (ТМ) (мастил, сумішей, присадок) для подолання зносу поверхонь, які працюють на тертя в деталях машин і механізмів, перш за все у двигунах внутрішнього згорання. Досвід з їх використання показує значний технічний та економічний ефект, оскільки підвищується строк експлуатації виробу, зменшується витрата палива за рахунок зменшення коефіцієнту тертя, тощо [2]. Однак виробники таких матеріалів недостатньо здійснюють експериментальні дослідження з поліпшення їх якості і, відповідно, недостатньо інформують замовників про правила використання та вибору ТМ для конкретних випадків експлуатації. Слід додати, що соціальні інтернет-мережі переповнені суперечною інформацією про використання того чи іншого ТМ, а ще частіше спостерігається перевищення їх реальних характеристик. Важливе значення мають методики вибору ТМ, які на сьогодні відсутні у відкритому доступі і, які кожен виробник формує лише з метою поліпшення умов реалізації своєї продукції.

З розвитком науково-технічного прогресу з'явилися ТМ на основі наноматеріалів, вартість яких у багатьох випадках є значною у порівнянні з досягнутим ефектом від їх вживання. Однак і появлення цих ТМ не вирішило проблему їх підбору, що провокує появу безлічі технологій нанесення ТМ та створення наноструктури деталей машин і механізмів [3-5].

Аналіз сучасних трибологічних наноматеріалів та їх характеристик

Відомо, що вибір трибологічних наноматеріалів (ТНМ) необхідно

проводити за наступними ознаками [6]:

- фізичним (агрегатним) станом об'ємного наноструктурованого матеріалу;
- розмірністю наноструктурних елементів;
- хімічним складом;
- походженням і способами отримання;
- способами (методами) нанесення; формування і використання;
- ступенем впливу на здоров'я людини;
- призначенням і властивостями.

Відповідно до [6], ТНМ за основними ознаками та призначенням покращення поверхонь, що працюють на тертя, класифікують на

- нанопорошки пластичних металів;
- нанопорошки полімерів;
- металокерамічні наноз'єднання;
- нанодіаманти;
- фулерени.

Великий вплив на вибір ТНМ має економічна складова, яка обумовлюється високою вартістю наноматеріалів [7]. Це пояснюється використанням для їх створення складного обладнання та унікальних технологічних процесів [8, 9].

Неможливо не згадати про необхідність забезпечення екологічності виробництва ТНМ, питання і проблеми якого досить не вирішені. На сьогодні існує лише перелік наноматеріалів з високим рівнем небезпеки та ризику для здоров'я людини [10–13]. Слід також зауважити, що при виробництві деяких ТНМ іноді виникає і вибухонебезпечність [14]. Відомо, що 10 % відомих нанотехнологічних процесів і наноматеріалів мають високий рівень небезпеки, 24 % – середній рівень і 66 % – низький рівень [15, 16].

Аналіз літератури показує, що існує проблема з науково обґрунтованими класифікаторами ТНМ, оскільки їх формування відстає від динаміки науково-технічного прогресу. Тому такі класифікатори ТНМ потребують постійного удосконалення шляхом систематизації нових розробок і деталізації основних класифікаційних ознак цих наноматеріалів. Складність створення класифікаторів і їх різноманітність підтверджено роботою [17]. Для підвищення достовірності таких класифікаторів слід провести оновлення даних за відповідними характеристиками існуючих і популярних на сьогодні наноматеріалів, що потребує багато часу та клопітливої праці. Тому доцільно для вирішення цієї проблеми використовувати онтологічну систему підтримки прийняття рішення (ОСППР) щодо вибору наноматеріалів для покращання трибологічних якостей контактуючих поверхонь механічних пар [18].

Мета дослідження

Створення онтологічної системи підтримки прийняття рішень при виборі ТНМ, які присутні на ринку України та європейських країн сьогодні і на найближчу перспективу, що враховує їх властивості, технології для їх нанесення, формування і використання.

Аналіз основних характеристик трибологічних наноматеріалів

Чисельну групу функціональних наноматеріалів становлять відновлюючи

наноматеріали (препарати, композиційні суміші і т.п.). Більшість з них випускають у формі добавок до олив, мащення, палива, технічної рідини і паливно-повітряної суміші. А деякі подають безпосередньо (без транспортуючої речовини) у зону тертя робочих поверхонь, наприклад, як у технології «КЕСОН» [19]. За даними виробників основною метою технології «КЕСОН» є продовження ресурсу автомобільних поршневіх двигунів без ремонту шляхом створення додаткової лінії захисту на поверхні тертя циліндрів. При обробці двигунів за цією технологією наноситься напилення металополімерного покриття «КЕСОН», яке рятує робочий шар циліндрів, кілець і поршнів від зносу у разі масляного голодування і локального перегріву масляного шару. За цією технологією нанесення технологічної рідини відбувається безпосередньо в циліндри двигуна за допомогою спеціального обладнання.

Після такої обробки в критичних ситуаціях масляного голодування і перегріву масляного шару замість зношування пари тертя «циліндр-кілець» відбувається зношування створеного захисного металополімерного покриття. При зношуванні цього шару в процесі експлуатації металополімерне покриття періодично відновлюється без розбирання двигуна. На рис. 1 показано результати трибологічних випробувань сталевих кульок ШХ15 при екстремальних навантаженнях протягом 1 години у моторному маслі М-8В з контактним тиском 500 МПа та частотою обертання 1500 хв.⁻¹ без покриття та з покриттям «КЕСОН».

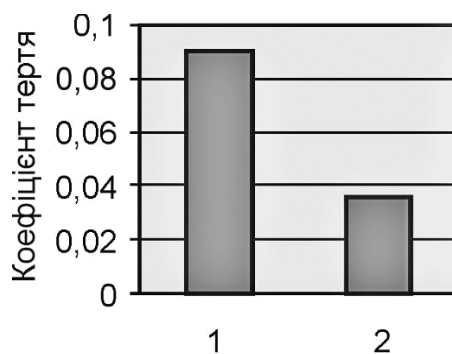


Рис. 1. Вплив металополімерного покриття на коефіцієнт тертя сталевих кульок ШХ15 при екстремальних навантаженнях: 1 – без покриття; 2 – з металополімерним покриттям «КЕСОН» [18]

Аналіз результатів цих випробувань дозволив встановити, що

- нанесення металополімерного покриття дозволяє більш ніж у 2 рази зменшити величину коефіцієнта тертя та знос металевих поверхонь навіть за екстремальних умов навантаження;

- величина номінального тиску при терті кілець-циліндр в автомобільних двигунах не перевищує 10 МПа, тому металополімерне покриття здатне тривалий час протидіяти зносу в умовах фрикційної взаємодії кілець з циліндрами.

Нанесення на циліндри двигуна металополімерного покриття забезпечує стабільну роботу мотора без погіршення технічних та екологічних параметрів протягом приблизно 50 000 км пробігу (або понад 1000 мотогодин). При повторній обробці циліндрів без розбирання двигуна номінальні значення компресії відновлюються. Періодичне відновлення циліндрів з інтервалом 40-

50 тис. км пробігу за технологією «КЕСОН» дозволяє продовжити ресурс експлуатації масових типів двигунів у паспортному режимі без капітального ремонту понад 300 тис. км пробігу. Технологія періодичного відновлення циліндропоршневої групи двигунів внутрішнього згоряння дозволяє без розбирання та ремонту збільшити ресурс двигуна. Виробники продукції попереджують, що незважаючи на простоту технології, вона розрахована на професійне застосування. Правильний вибір ТНМ «КЕСОН» полягає в точному та повному діагнозі стану мотора, професійному виборі способу усунення несправностей та грамотному їх застосуванні.

Альтернативний досвід показує іншу фізичну дію, що проявляють ТНМ з наночастинками, які здатні заповнювати мікро-западини на поверхнях тертя і утворювати антифрикційні, зносостійкі та адгезійні плівки (покриття). До складу шаруватих модифікаторів таких ТНМ входять наночастинки ди- і трисульфиду молібдену, диселеніду молібдену, дисульфиду вольфраму і графіт. Дія кондиціонерів металів («Fenom metal Conditioner», «ER», «Micro-X2», «DuraLub», «MILITEK»), що базується на трибохімічних реакціях утворення, розпаду та відновлення у зоні тертя з'єднань металів з активними молекулами (хлору і сірки) цих кондиціонерів [19].

Кондиціонер металу «FENOM» призначений для захисту двигунів внутрішнього згоряння будь-якого типу від зношування. До такого кондиціонеру металу входять солі м'яких металів, спеціальні добавки та витяжки з фторопласту, що діють безпосередньо на трибосистеми, створюючи плівку (сервовитний прошарок) товщиною до 10 мкм. Присадки при введенні в оливу створюють на поверхнях тертя:

- захисну плівку з чистого заліза, що здатна до самовідновлення, підвищує міцність масляної плівки в зоні тертя та уповільнює процес її деструкції;

- покращують ресурсні та експлуатаційні показники двигуна в штатних та екстремальних умовах (втрата олії та охолоджуючої рідини, перегрів, високі навантаження, холодний пуск).

За використання принципів нанотехнології для зниження зносу та тертя розробка продуктів лінії «FENOM» відзначена нагородами на міжнародних салонах винаходів та інновацій у Женеві, Сеулі, Ліоні та ін. За ствердженням виробників продукт ТНМ забезпечує ефективний захист від зносу та задирів, зростання потужності та крутного моменту двигуна за рахунок зменшення механічних втрат, зниження витрати палива та витрати олії, зниження зносу при холодному пуску двигуна, зменшення рівня шумів та вібрацій.

Кондиціонер металу «ER» – це концентрований активний продукт, що забезпечує найвищий ступінь захисту двигуна від зносу. За рекламою навіть у разі аварійного витоку мастильного матеріалу захисний ефект зберігається протягом деякого часу, але «ER» не є мастильним матеріалом, оскільки має принципово інший трибологічний ефект і впливає безпосередньо на поверхні тертя металевих деталей. Він подається у вузли тертя з наявним носієм – моторним або трансмісійним маслом, пластичним мастилом, паливом (дизельним або бензином). Для кращої обробки поверхні потрібно її нагрівання до температури щонайменше +40...+65 °С, при цьому, чим вище температура, тим швидше досягається ефект. Такий ТНМ не містить фторопласту, графіту, молібдену, цинку та адаптовано до всіх сучасних моторних мастил.

Досвід використання «ER» показує, що можливо реалізувати ефект «незношуваності»: забезпечення значного зниження коефіцієнта тертя у вузлах та механізмах, що збільшує термін служби агрегатів та механізмів та критичне навантаження, а також зниження шумів та вібрацій, зростання потужності та крутного моменту, зменшення витрат палива на 5-10%, полегшення холодного запуску двигуна. Відмічається, що застосування препарату не призводить до зміни в'язкісно-температурних характеристик, лужності, зольності та інших фізико-технічних показників моторних мастил та інших мастильних матеріалів.

«SR3» компанії Dura Lube – це суворо дозована суміш високотехнологічних компонентів переробки нафти, з'єднаних в результаті унікального технологічного процесу у ТНМ з оптимальним складом для значного зниження тертя. Такий ТНМ не має у своєму складі твердих частинок (графіту, дисульфиду молібдену, кремнію тощо), екологічно шкідливих речовин (наприклад, свинцю) і містить спеціальний компонент «SR3», що забезпечує сумісність з маслами всіх марок. Компоненти «SR3», що входять до складу препарату, активно притягуються металом і, з'єднуючись з усіма металевими поверхнями, формують з'єднання однорідної молекулярної щільності (шар – мастило), що вирівнює і ущільнює мікропори. В результаті цього впливу стійкість металу в області контакту деталей багаторазово збільшується, величина сил тертя різко знижується (до 68%). Деталі стають «надслизькими» по відношенню один до одного, що призводить до зниження непродуктивних витрат енергії на подолання сил тертя між деталями двигуна та зростання його ефективної потужності. Деталі двигуна, що оброблено «SR3», довго переносять режим «сухого тертя» без зміни геометричних розмірів і руйнування (наприклад, при запуску холодного двигуна взимку). За даними виробників також забезпечуються наступне [20]:

- зменшення тертя та збільшення ресурсу двигуна на 70 %;
- економія палива на 5–12 %;
- підвищення потужності двигуна;
- зниження робочої температури двигуна, запобігання його перегріву та заклинювання в аварійних ситуаціях;
- очищення та захист масляної системи від лаконагарних відкладень.

Аналіз даних різних ТНМ показав, що за останні 15 років жодному виробнику не вдалося розробити та впровадити щось подібне до формули «SR3». Властивості кондиціонера металу для всіх типів двигунів (Advanced Engine Treatment) більше схожі на вигадку, ніж на речовину, що реально працює. Dura Lube як виробник «SR3» гарантує справну роботу деталей двигуна при будь-яких морозах, стійкість роботи та зниження витрат на паливо та олії принаймні до наступної заміни (не менше ніж за 200 км). Відзначається також, що бензиновий двигун без особливих зусиль може пройти до 600 тис. км без капітального ремонту.

Вся лінійка продукції, пропонується компанією Dura Lube, пройшла серйозні випробування у важких експлуатаційних умовах і має лише позитивні відгуки та висновки. Продукція компанії Dura Lube застосовується не тільки в автомобілебудуванні, а також важкій індустрії, авіації, річковому та морському пароплаванні, на залізниці тощо.

«Militec-1» – це 100% синтетична присадка до оливи, створена на основі найсучаснішої технології наночастинок [21]. Активні компоненти продукту діють безпосередньо на металевих частинах, створюючи зв'язок на молекулярному

рівні і проникаючи у міжкристалічний простір поверхневих шарів. Як результат створюється дуже тонкий і дуже міцний захисний шар. «Militec-1» не містить шкідливих твердих елементів, не змінює пружних властивостей металу. «Militec-1» добре змішується з усіма моторними, трансмісійними та гідравлічними оливами, незалежно від їх в'язкості та класу якості. Можна зазначити основні переваги її використання:

- зменшує тертя та збільшує захисний шар взаємодіючих елементів, що подовжує термін служби двигуна;

- змінює властивості поверхонь тертя, створюючи міцний шар, який захищає двигун під час запуску, усуваючи мінімальні ефекти критичного холодного старту фази двигуна;

- зменшує виділення тепла між металевими частинами;

- повний і безперервний максимальний захист сполучених частин.

«Militec-1» використовується в бензинових та дизельних двигунах (50 мл на 1 л олії кожні 20 тис. км) та в механічних коробках передач (60 мл на 1 л олії кожні 50 тис. км). Препарат можна застосовувати в автоматичній коробці перемикачів передач, диференціалі та гідравлічній техніці.

Поряд з кондиціонерами, що утворюють захисний шар, існують рекондиціонери, які додатково сприяють підвищенню несучої здатності (міцності) масляної плівки, а також епіламні ТНМ з антифрикційними і зносостійкими властивостями на основі фтор-поверхневоактивних речовин (ПАР).

Реметалізанти «TRIBOL-D», «Lubrifiilm», «Кластер» основані на явищі вибіркового переносу з механізмом дії трибохімічного металоплакування поверхонь тертя і, як результат, – це осадження металевих компонентів, що входять до складу реметалізаторів.

Дослідження ефекту «незношуваності» дали імпульс розвитку нових технологій підвищення зносостійкості трибосистем. Сервовитні плівки можуть утворюватися на основі металів: мідь, цинк, олово, срібло. Для цього відповідні компоненти повинні бути введені в мастильний матеріал чи робоче середовище. Такий принцип ліг в основу розробки і застосування металоплакувальних мастильних матеріалів. У 1979 р. швейцарська компанія Actex S.A. уперше почала серійне виробництво металоплакувальних порошкових препаратів марки «Lubrifiilm», заснованих на практичній реалізації ефекту беззношності й призначених для безрозбірного відновлення трибосистем [19]. На базі металоплакувальних присадок з'явилися методи й засоби для безрозбірного відновлення машин і механізмів Smart-self technologies (інтелектуальні технології самовідновлення). Всі відомі на цей час методи й засоби для безрозбірного відновлення трибосистем за компонентним складом, фізико-хімічним процесом взаємодії з поверхнею тертя, властивостям отриманих покриттів (захисних плівок), а також механізмом функціонування варто ділити на три основні групи: металоплакувальні композиції (реалізують ефект вибіркового переносу); речовини, які полімеризуються; металокерамічні матеріали. До відновлювальних присадок, які дають найбільший техніко-економічний ефект, варто віднести кондиціонери металу й інші ПАР, а також добавки модифікаторів. Ці продукти відрізняються за умовами й способами застосування. У роботах фізично обґрунтовано та розроблено технологічний процес електротрибохімічного плакування в композиційній оліві зразків трибосистеми «гільза циліндра – поршневе кільце» шаром міді [9].

Lubrifilm відновлює робочі параметри двигуна, зношені ділянки циліндрів та вкладишів. Це гарантує понад 150 000 км пробігу, а також: відновлення рівня компресії, економія палива шляхом усунення перевитрати внаслідок зношування двигуна, покращення споживання олії та покращення працездатності підшипників, чисті свічки та клапани, полегшення холодного старту.

Полімероплакуючі суміші («NanoJell-C», «DIX-600», «Slik-50», «Ligvid Ring», «Lubrilon», «Microlon») утворюють на металевих поверхнях зносостійку фторопластову плівку (тверде змащувальне покриття). Але молекулярній структурі фторопласту в рідкій фазі (перфторполієфір) не притаманні компенсаційні властивості, тобто створюється м'яке покриття, що не витримує динамічних та теплових навантажень. Головним недоліком є те, що фторопласт є активним каталізатором хімічного руйнування металу [19].

Достатньо ефективними вважаються ревіталізанти (геотрибомодифікатори або геомодифікатори тертя). Найбільш відомими є нанопрепарати «РВС», «Repon», «Нанопротек», «ХАДО», «Мегафорс» та ін. Їх дія полягає в утворенні антифрикційних і зносостійких вуглецево-металокерамічних покриттів на поверхнях тертя. Відновлюючі наноматеріали відрізняються також видом ПАР. Поки що застосовують нафтохімічні ПАР (емультал, ЕС-2, нафтохім, нафтенол). Але все частіше віддають перевагу екологічно безпечним біоПАР, які синтезують на базі ріпакової й соняшникової олій.

Науково-виробнича фірма «Мегафорс» (Україна) створює власний якісний продукт, успішно виробляє та реалізує триботехнічні суміші, зокрема, присадки (добавки) до олії, пластичні мастила, рідке паливо та технологічні рідини під Торговою маркою «Мегафорс» є моторні олії SmartOil з унікальними властивостями – збільшення ресурсу всіх видів транспортних засобів, промислового та сільськогосподарського обладнання, а також обладнання побутового та спортивного призначення [22]. Добавки збільшують термін служби механізмів авто у 2–3 рази та економлять паливо на 10-15 %. Продукція регулярно проходить сертифікацію у системі CERTEX (реєстраційний СДС 01 Держстандарту України). На сайті фірми представлені всі види продукції «Мегафорс» з описом їх призначення та ефективності застосування. На сьогодні компанія має 5 рекордів з пробігу автомобіля без олії із занесенням до книги Рекордів України. Найбільший пробіг було здійснено на 1731 км за маршрутом «Харків – Сімферополь» у 2011 році. Унікальним ТНМ цієї фірми є триботехнічний засіб «МЕГАФОРС» – наномодифікатор тертя, силікато-фулереновий склад для поверхонь, що труться, який відноситься до відновників (реноваторів).

«МЕГАФОРС» призначений для обробки деталей та механізмів, у тому числі і автомобільних, з метою підвищення їх зносостійкості, а також відновлення цих деталей, якщо вони вже зношені, за рахунок отримання в зоні тертя протизносного метало-силікато-вуглецевого шару (вуглець у вигляді фулеренів). Він використовується як добавка до олії (автомобільні, індустріальні, компресорні, гідравлічні та ін.), до пластичних мастил та технічної рідини (технологічні, гідравлічні та ін.).

Неможливо не сказати про добавку у мащення «Мегафорс-трансмесія», що має властивості функціонального (відновлюючого) наноматеріалу, який відноситься до групи ревіталізаторів, у вигляді суспензії на основі технічної оливи, що містить наночастинки мінералів антигориту, бурого алевроліту,

клінохлору і шунгіту, які отримали механічним диспергуванням у млині і дезінтеграторі, без ПАР. Цей ТНМ має низький рівень небезпеки для здоров'я людини, та використовується у складі експлуатаційних марок трансмісійної оливи з метою утворення антифрикційних і зносостійких плівок на поверхнях деталей трансмісії машин і модифікації тертя.

Слід зауважити, що головним недоліком проаналізованих ТНМ [18-22] є забруднення навколишнього середовища із забрудненням питної, ґрунтової та поверхневої води. Органічне забруднення стає перш за все серйозною небезпекою, тому на сьогодні на ринку ТНМ з'явилися наноалмази як специфічний універсальний нановуглецевий ТНМ, що має властивості розкладання шкідливих органічних хімікатів [23]. «Lubrifiilm Diamond Run Ln», «Nanodiamond Green Run» – це найпоширеніші на даний час їх представники, що створюють пластифікування, деформування (вдавлювання) і наклеп мікроставупів поверхонь тертя, на відміну від звичайного припрацювання, під час якого домінує сколювання і руйнування мікроставупів. На рис. 2 показано вигляд наноалмазів розміром діаметру біля 6 нм під мікроскопом.



Рис. 2. Світлина наноалмазів з діаметром 6 нм [24]

Конкуренцію «Lubrifiilm Diamond Run Ln», «Nanodiamond Green Run» складають наноприсадки «Fenom Nanodiamond Green Run» (на основі наноалмазів), «Fenom Old Char» (на основі наночастинок бентоніту), «Renom Engine Nanoguard» (для моторних масел) та «Renom Gear Nanoguard» (для трансмісійних масел). Наноприсадка «Fenom Nanodiamond Green Run» містить наноалмази діаметром до 6 нм та кластерний вуглець. Обробка трибоповерхні цим препаратом призводить до економії палива та олії, а також до зниження шкідливих викидів у навколишнє середовище. Наноприсадка «Fenom Old Char», яка створена із застосуванням золь-гель технології, включає нанорозмірні комплекси органічних речовин, що утворюють на поверхнях тертя захисні шари та збільшують адгезію олії до металу.

Наноприсадка «Renom Engine Nanoguard» містить сучасні наноконпоненти «NanoJell-C» – суміш наноалмазів (діаметром 4–6 нм) та наночастинок політетрафторетилену з підвищеною поверхневою енергією, що знаходяться в олії у вигляді нанокансул. При роботі двигуна наноконпоненти утворюють на металевих поверхнях стійку до стирання при температурах до 500 ° С плівку, яка рівномірно заповнює всі нерівності на поверхні металу, знижуючи втрати на тертя та захищаючи тертя поверхні від зносу.

Наноприсадка Renom Gear Nanoguard, що підвищує ресурс і покращує експлуатаційні показники агрегатів трансмісії автомобіля, містить сучасні наноконпоненти NanoJell-Mo (дисперсія наноалмазів, наночастинок політетрафторетилену в складних полієфірах і молібденових сполученнях), які формують на поверхнях тертя захисну наноструктуровану плівку, що знижує втрати на тертя та знос деталей трансмісії.

Наноприсадки на основі фулеренів містять фулерени (англ. Fullerene) – молекулярні форми вуглецю з можливою кількістю атомів від 20 до 940, розташованих у вершинах багатокутників, що утворюють сферу. Наявність фулеренів у присадках до мастильних матеріалів ініціює на поверхнях тертя утворення захисної фулереново-полімерної плівки товщиною 100 нм. Утворена плівка захищає поверхні деталей машин від термічної та окисної деструкції, збільшує термін експлуатації вузлів тертя в аварійних ситуаціях у 3–8 разів, здатність вузлів тертя у 2–3 рази, розширює робочий інтервал тисків вузлів тертя у 1,5–2 рази [25].

Фулерені входять до складу композиції «Мегафорс». Нанокластери можуть бути утворені із речовин, яким властивий шаруватий тип структури (графіт, сульфід молібдену, кремнезем та ін.). Широке застосування в напрямі інженерії поверхні знайшли матеріали із вуглецевими нанотрубками (одностинними та багатостинними) та нановолокнами [26]. Наприклад, введення в мінеральну оливу 0,5 % присадки на основі ВМ «Тауніт» зменшує коефіцієнт тертя в 1,4–1,8 рази. До двомірних належать графеноподібні наночастинки дисульфиду молібдену ($2H-MoS_2$), які додають до мастильних матеріалів.

Широкий перелік засобів покращення роботи двигунів та механізмів ставить для користувачів велику задачу вибору того чи іншого препарату. Цей вибір полегшили виробники мастил, які самі стали вводити в склад мастил добавки, які були розроблені за заказом для мастил того типу, що вони виробляють. За оцінками спеціалістів автосервісу нові авто не потребують спеціальних добавок, якщо використовується рекомендоване виробником техніки мастило. В жодному разі це не повинні робити самі експлуатанти аматорським методом.

Тим не менш, завдяки великої номенклатури трибологічних наноматеріалів, що виробляються промисловістю, різноманітними областями та методами їх використання, вибір раціонального для певного випадку наноматеріалу для фахівців представляє певні труднощі. Онтологічна система підтримки прийняття рішення щодо вибору трибологічних наноматеріалів дозволяє вирішити цю проблему.

Онтологічна система підтримки прийняття рішення щодо вибору трибологічних наноматеріалів

Досягнення в області створення інтелектуальних систем з кожним роком стають все більш помітними і значущими. Нині в техніці активно використовуються програми розпізнання образів, текстів, мови; бази даних і знань; онтологічні системи і системи 3D-моделювання складних технічних систем. Все це дає можливість розпочати створення інтелектуальних помічників проектувальників нових виробів на всіх етапах їх життєвого циклу. Проектування як процес і область знань про артефакт є предметом онтологічного аналізу вчених-дослідників і вузьких фахівців.

Для визначення раціонального рішення у сучасній техніці використовується система онтологій, що складається, як правило, із трьох онтологій: онтології предметної галузі, онтології завдань та метаонтології [27, 28 та ін.].

У переважній більшості випадків процес створення онтологій значно суб'єктивований як за формою проведення, так і за змістом. Його об'єктивізація до відомого рівня досягається в практиці онтологічного інжинірингу за допомогою формування та застосування спеціалізованого набору методів набуття знань, вибраних із номенклатури стандартних методів [29].

Однак при традиційному підході не гарантується повнота охоплення предметної галузі та якість її подання у формі знань, придатних для комп'ютерної обробки. З іншого боку, уявлення знань зазвичай супроводжується інформаційною надмірністю. Таким чином, ефективність застосування онтологічного підходу до подання знань про світ трибологічних наноматеріалів для покращання якостей механічних контактуючих поверхонь деталей машин і механізмів значною мірою визначається рівнем об'єктивності набутих знань.

Оцінка ефективності процесу набуття знань під час створення онтологій базується на таких основних ідеях та підходах:

1) питання до експерта мають вигляд тестів з двома або більше варіантами відповідей; питання задаються у певній чи випадковій послідовності; оцінка визначається як відношення кількості придатних для використання відповідей до кількості всіх питань;

2) у разі, якщо питання експерту задаються у випадковому порядку, випадковість визначається ймовірностями актуальності того чи іншого питання (під актуальністю тут розуміється наявність чи відсутність зв'язку між цим та попереднім питаннями, складність питання тощо);

3) питання класифіковані за типами, і хоча вони ставляться випадковим чином, при цьому обов'язково дотримується співвідношення кількості питань різних типів; для кожного типу питань існують процедури оцінювання відповідності, при цьому загальна оцінка ефективності процесу набуття знань є інтегральним показником.

При створенні метаонтології «Трибологічні наноматеріали» застосовувалися такі два види тактики:

1) експерт шляхом упорядкування безлічі вихідних питань складає з них цілісну картину світу трибологічних наноматеріалів із зазначенням концептів та відносин між ними;

2) на кожному кроці експерту пропонується кілька питань, з яких він вибирає одне, найбільше на його погляд частинне, і на нього відповідає, після чого переходить до більш спільного питання.

Розглянемо аспекти формування метаонтології «Трибологічні наноматеріали» відповідно до вимог стандарту онтологічного дослідження IDEF5 [30]:

1. Формування та систематизація початкових умов із встановленням основних цілей розробки онтології.

2. Збір та накопичення вихідних даних.

3. Обробка даних, коли він аналізується і групується вихідна інформація.

4. Початкове розроблення онтології – формування попереднього варіанта.

5. Уточнення та верифікація онтології.

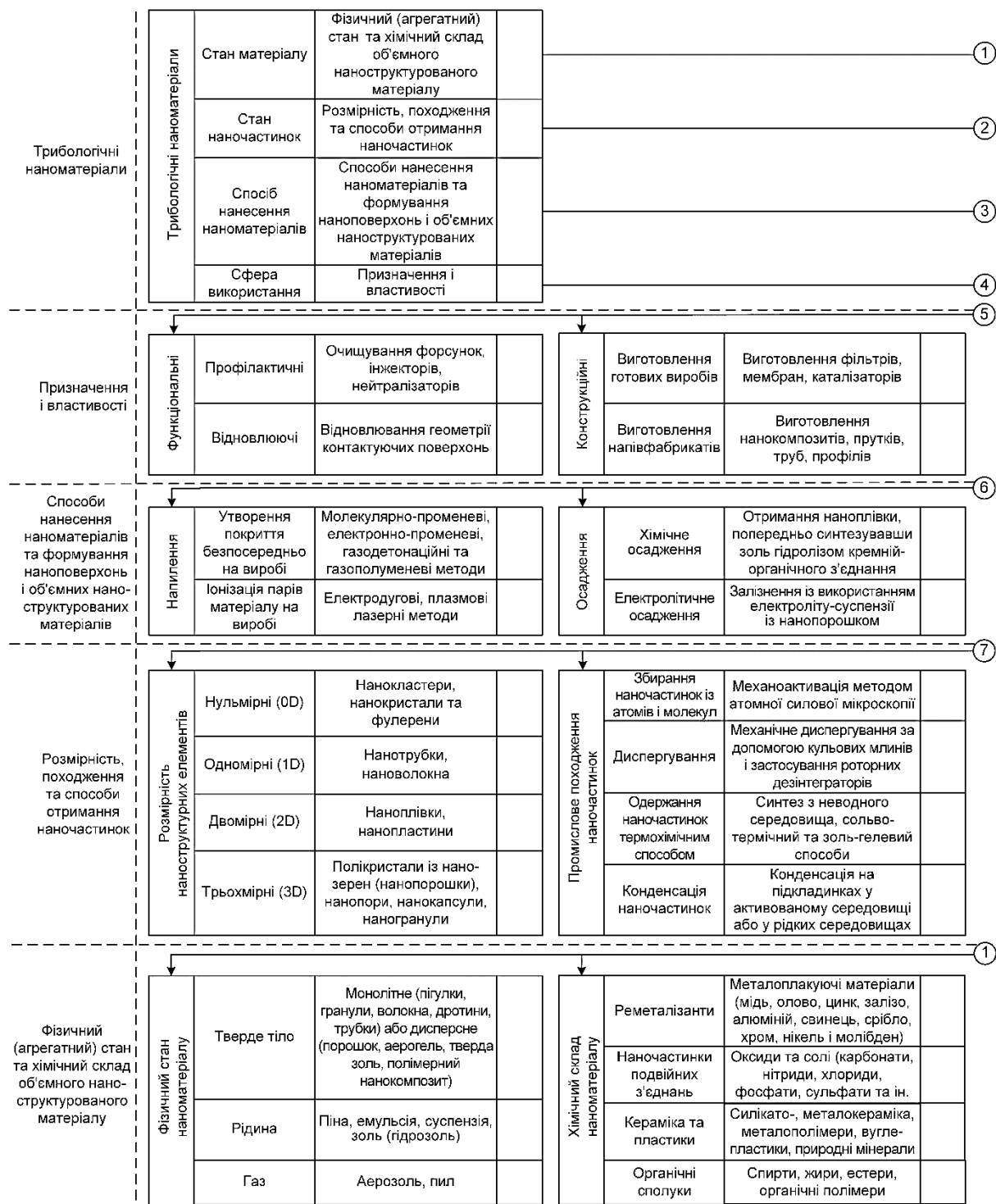


Рис. 3. – Метаонтологія «Трибологічні наноматеріали»

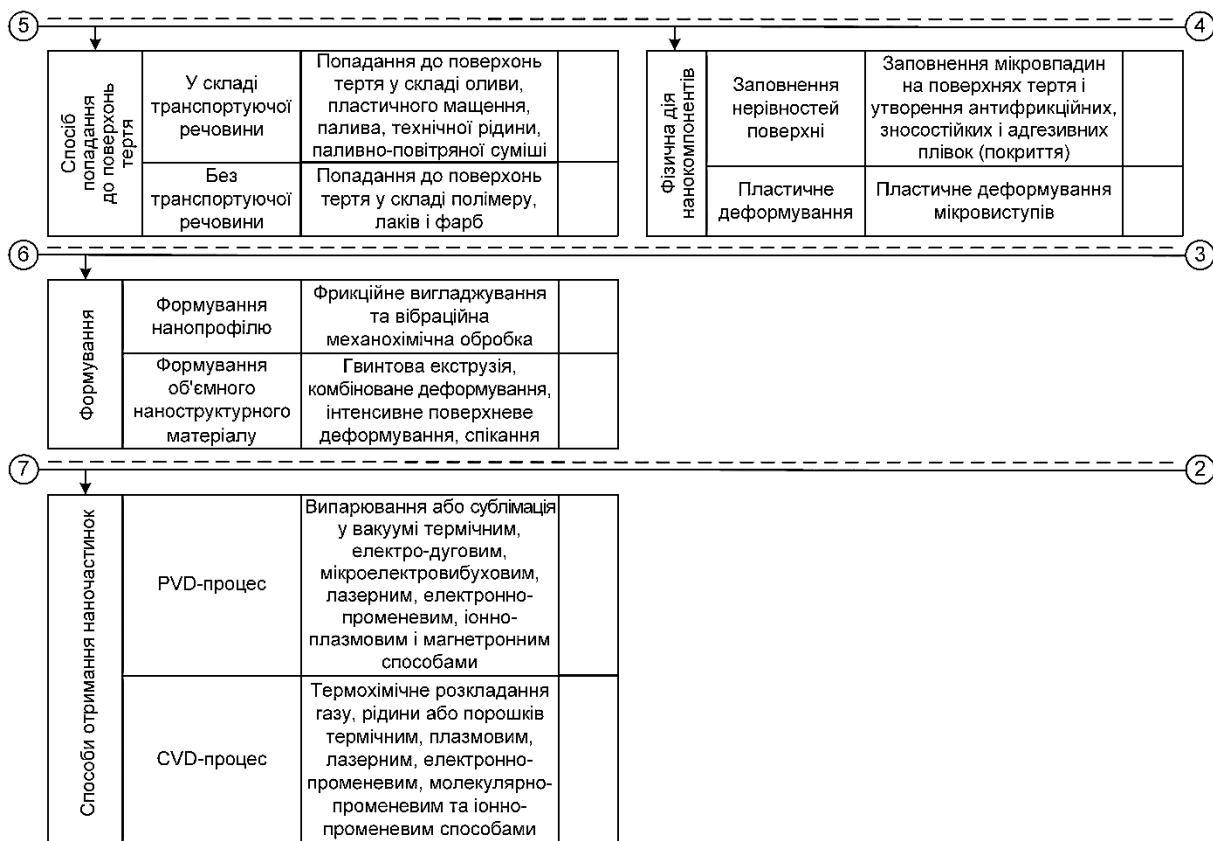


Рис. 3. Закінчення

Для розробки метаонтології «Трибологічні наноматеріали» використали низхідний підхід [31]. У цьому підході нижчому (початковому) рівні перебувають елементарні одиниці. Для трибологічних наноматеріалів встановлюються невизначені поняття (наприклад, конкретні види наноматеріалів). На наступних рівнях розташовуються абстрактні поняття «реметалізанти», при цьому вищий рівень містить найзагальніші поняття, а саме «стан матеріалу», які з тими чи іншими атрибутами багаторазово присутні в метаонтології.

На рис. 3 представлено метаонтологію «Трибологічні наноматеріали» у формі ієрархії фреймів.

У принципі, за підтримки (розвитку) метаонтології «Трибологічні наноматеріали» може бути реалізований режим автоматизованого придбання знань. Нижче наведено узагальнений алгоритм реалізації даного процесу:

1. Визначити типи відносин між поняттями метаонтології «Трибологічні наноматеріали».
2. Визначити частоти, з якими зустрічаються в текстологічному джерелі знань іменники.
3. Запропонувати процедуру виключення надлишкових іменників та реалізувати її.
4. Вважаючи отримані іменники визначальними поняттями, визначити їх відношення з іншими термінами предметної області за допомогою отримання відповідної безлічі дієслів (є, включає в себе, складається, дозволяє, формує, ділить, ...).
5. Якщо вже зафіксовані поняття та відносини вимагають інтерпретації, то сформувати тлумачний словник предметної галузі.

6. Сформувати множини означальних іменників, які стосуються обумовлених іменників. При цьому зафіксуватиме їх атрибути.

7. Реалізувати додаткові процедури, які необхідні для уточнення, кращого розуміння та забезпечення повноти онтології.

Висновки

1. Виконано аналіз основних характеристик трибологічних наноматеріалів для підвищення зносостійкості і довговічності механічних контактуючих поверхонь деталей машин і механізмів; надано характеристики, області та методи застосування цих матеріалів.

2. Визначено основні ідеї та підходи щодо оцінки ефективності процесу отримання знань у формуванні онтологічної системи підтримки прийняття рішень при виборі трибологічних наноматеріалів.

3. Детально розроблено метаонтологія «Трибологічні наноматеріали».

Список літератури

1. Encyclopedia of Tribology / Q. Jane Wang, Yip-Wah Chung. – Springer, NY, 2013. – 52 s. doi: 10.1007/978-0-387-92897-5.

2. Закалов О. В. Триботехніка і підвищення надійності машин : Навчальний посібник / Закалов О. В. — Тернопіль : ТДТУ , 2000 – 360 с.

3. Zhengchuan Z., Konoplianchenko Ye. V., Tarelnyk V. B., Guanjun L., Xin D., Yao J., & Zhaoyang S. (2022). Industry Application of the Coatings on the Bearing Bush by Electro Spark Alloying Technology. Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, (1(52), 15–23. Вилучено з: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1\(52\)-15-23](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1(52)-15-23)

4. Liu N., Liu Q., Li Z., Bai Y., Sun Y.W., Li Z. D., Bao M. Y., Zhan H., Guo D. G., Ma Y. S. Tribological behavior of plasma-sprayed metal based solid self-lubricating coatings under heavy load. Wear. 2021. vol. 486-487, art. No. 204108. doi: 10.1016/j.wear.2021.204108.

5. Korduban O., Kryshchuk T., & Medvedskij M. (2021). A new method for the synthesis of nanomaterials for the needs of nanotechnologies. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, (4), 77–85. Вилучено з: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2021.04.077>

6. Состав наноприсадок к автомобильным смазывающим материалам и их влияние на процессы трения и износа деталей машин / Олишевская В. Е., Басс К. М., Олишевский Г. С., Гололобов О. Б. // Вісник Дніпропетровського університету. Серія «Ракетно-космічна техніка». – 2015. – Вип. 18, том 1. с. 123–130.

7. The delivery of nanoparticles / A. A. Hashim. – InTech: Croatia, 2012. – 552 p.

8. Влияние различных факторов на морфологию поверхности покрытий типа WC, осажденных ионно-плазменным методом / Д. В. Слюсарь, В. П. Колесник, О. Н. Чугай, Л. В. Литовченко, Н. П. Степанушкин, С. Л. Абашин, С. В. Олейник // Авиационно-космическая техника и технология. – 2018. – № 6. – С. 76–82.

9. Характеристики розряду магнетронної системи для розпилення, осадження покриттів та застосування у нанотехнології / А. О. Бреус, О. Л. Сердюк, В. І. Рузайкін, О. О. Баранов // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2020. – № 6(166). – С. 72–79.

10. Михайленко В. М. Нанотехнології – перспективи застосування та ризику для здоров'я людини / Михайленко В. М., Михайленко П. М., Єлейко Л. О. // Онкологія. – 2008. – Т. 10, № 4. – С. 420–426. Вилучено з: <https://www.oncology.kiev.ua/article/789/nanotexnologii-perspektivi-zastosuvannya-ta-riziki-dlya-zdorov-ya-lyudini> – 20.10.2022

11. Эффективный режущий инструмент с нанопокртиями и наноструктурными модифицированными слоями: монография-справочник: в 2-х кн. / Г. И. Костюк // Харьков: Планета-Принт, 2016 – Кн. 2 – 507 с.

12. Технологічні особливості обробки наноконпозиціями ливарних жаростійких сплавів для авіаційних двигунів / М. В. Грекова, Н. Є. Калініна, В. Т. Калінін [та ін.] // Авиационно-космическая техника и технология. – 2019. – № 7(159). – С. 134–138.

13. Затуловський А. С. Технологія отримання пічним наплавленням композиційних шаруватих матеріалів з функціональним триботехнічним шаром, які зміцнені нанорозмірними карбідами та оксидами / А. С. Затуловський, В. О. Щерецький // Процеси лиття. – 2019. – № 4. – С. 35–42.

14. Review of the Explosibility of Nontraditional Dusts / S. M. Worsfold, P. R. Amyotte, F. I. Khan et al. // Ind. Eng. Chem. Res. – 2012. – V. 51 (22). – P. 7651–7655.

15. Удовицкий В. Г. О терминологии, стандартизации и классификации в области нанотехнологий и наноматериалов / В. Г. Удовицкий // Фізична інженерія поверхні. – 2008. – № 1–2. – С. 193–201.

16. ISO/TR 11360:2010. Nanotechnologies – Methodology for the classification and categorization of nanomaterials (Нанотехнологии. Методология для классификации и категоризации наноматериалов).

17. Фастовець П. М. Класифікація наноструктурованих матеріалів для інженерії поверхні деталей машин / Восточно-Европейский журнал передовых технологий. № 3/5 (57). – 2012. – с. 19–25.

18. Восстановление компрессии в двигателях автомобилей, мотоциклов и водного транспорта без разборки двигателя [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://autotuning-service.com.ua/pages/keson.html>

19. Триботехнічні матеріали [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.tsatu.edu.ua/tsst/wp-content/uploads/sites/6/lekcija-11-trybotehnichni-materialy-z-dyscypliny-trybotehnika-133-hm.pdf>

20. Dura Lube з SR3 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://zapchasti.ria.com/uk/dura-lube-s-sr-3-novaya-prysadka-v-dvygatel-dlya-legkovogo-avto-23555308.html>

21. Смазка MILITEC-1, 15 мл [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://roks.in.ua/mastilo-militec-1-15-ml>

22. Моторні оливи SMARTOIL Надійний захист двигуна [Електронний ресурс]. Режим доступа: <https://megaforce.ua/uk>

23. Bogdanowicz R., Functionalized nanodiamonds as a perspective green carbo-catalyst for removal of emerging organic pollutants, Current Opinion in Solid State and Materials Science. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2022.100991>

24. Долматов В. Ю. Детонационные наноалмазы: синтез, строение, свойства и применение [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://sktb-technology.ru/detonation_nanodiamonds/

25. Триботехнология восстановления деталей мобильной с.-х. и транспортной техники модификацией моторного масла фуллеренсодержащим

составом / В. В. Аулин, А. Д. Деркач, А. И. Буря [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 4. – С. 26–29.

26. Вплив часу формування синтезованих наноструктур на морфологічні показники їх якості – зростання діаметра пор у наноструктурованому покритті / Я. О. Сичікова, Н. І. Косач, В. Б. Большаков, Г. О. Шишкін // Український метрологічний журнал. – 2020. – № 4. – С. 43–49.

27. Gomez-Perez A. Ontologies: Theory, methods and tools. Tutorial. The Fourth Summer School on Ontological Engineering and the Semantic Web, 2006 (SSSW'06).

28. Gruninger M., Atefi K., Fox M., Ontologies to support process integration in enterprise engineering, Computational and Mathematical Organization Theory, 6, pp. 381–394, 2000.

29. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2000. – 384 с.

30. Futrell, M. T. The IDEF5 Application Procedure. Master's Project Report. Department of Industrial Engineering, Texas A&M University, College Station, TX, 1991. – 187 p.

31. Воробйов Ю., Нечипорук М., Майорова К. Застосування онтологічних систем підтримки прийняття рішень при виборі технології та засобів технологічного оснащення для складання і ремонту транспортних засобів // Системи і засоби транспорту. Проблеми експлуатації і діагностики : монографія / Blatnický Miroslav, Dižo Ján, Gerlici Juraj та ін.; за наук. ред. проф. Грицюка Ігоря. – Херсон: ХДМА, 2019. – С. 395–408.

Reference

1. Encyclopedia of Tribology / Q. Jane Wang, Yip-Wah Chung. – Springer, NY, 2013. – 52 s. doi: 10.1007/978-0-387-92897-5.

2. Zakalov O. V. Trybotexnika i pidvyshhennya nadijnosti mashyn: Navchalnyj posibnyk / Zakalov O. V. – Ternopil: TDTU, 2000 – 360 s.

3. Zhengchuan Z., Konoplianchenko Ye. V., Tarel'nyk V. B., Guan'jun L., Xin D., Yao J., & Zhaoyang S. (2022). Industry Application of the Coatings on the Bearing Bush by Electro Spark Alloying Technology. Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, (1(52)), 15–23. Вилучено з: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1\(52\)-15-23](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1(52)-15-23)

4. Liu N., Liu Q., Li Z., Bai Y., Sun Y.W., Li Z. D., Bao M. Y., Zhan H., Guo D. G., Ma Y. S. Tribological behavior of plasma-sprayed metal based solid self-lubricating coatings under heavy load. Wear. 2021. vol. 486-487, art. No. 204108. doi: 10.1016/j.wear.2021.204108.

5. Korduban O., Kryshchuk T., & Medvedskij M. (2021). A new method for the synthesis of nanomaterials for the needs of nanotechnologies. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, (4), 77–85. Вилучено з: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2021.04.077>

6. Sostav nanoprisadok k avtomobil'nym smazyvajushhim materialam i ih vlijanie na processy trenija i iznosa detalej mashin / Olishevskaja V. E., Bass K. M., Olishevskij G. S., Gololobov O. B. // Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu. Serija «Raketno-kosmichna tehnika». – 2015. – Vip. 18, tom 1. s. 123–130.

7. The delivery of nanoparticles / A. A. Hashim. – InTech: Croatia, 2012. – 552 p.

8. Vlijanie razlichnyh faktorov na morfologiju poverhnosti pokrytij tipa WC, osazhdennyh ionno-plazmennym metodom / D. V. Sljusar, V. P. Kolesnik, O. N. Chugaj, L. V. Litovchenko, N. P. Stepanushkin, S. L. Abashin, S. V. Olejnik // Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija. – 2018. – № 6. – S. 76–82.

9. Xarakterystyky rozryadu magnetronnoi sy`stemy dlya rozpylennya, osazhdennya pokryttiv ta zastosuvannya u nanotexnologiyi / A. O. Breus, O. L. Serdyuk, V. I. Ruzajkin, O. O. Baranov // Aviacijno-kosmichna texnika i tehnologiya. – 2020. – # 6(166). – S. 72–79.

10. Myxajlenko V. M. Nanotexnologiyi – perspektyvy zastosuvannya ta ryzyky dlya zdorovya lyudyny / Myxajlenko V. M., Myxajlenko P. M., Yelejko L. O. // Onkologiya. – 2008. – T. 10, # 4. – S. 420–426. Vylucheno z: <https://www.oncology.kiev.ua/article/789/nanotexnologii-perspektivi-zastosuvannya-ta-riziki-dlya-zdorov-ya-lyudini-20.10.2022>

11. Jeffektivnyj rezhushhij instrument s nanopokryttijami i nano-strukturnymi modifitsirovannymi slojami: monografija-spravochnik: v 2-h kn. / G. I. Kostjuk // Har'kov: Planeta-Print, 2016 – Kn. 2 – 507 s.

12. Texnologichni osoblyvosti obrobky nanokompozyciyamy lyvarnyx zharostijnyx splaviv dlya aviacijnyx dvyguniv / M. V. Grekova, N. Ye. Kalinina, V. T. Kalinin [ta in.] // Avyacyonno-kosmycheskaya texnyka y technologyya. – 2019. – # 7(159). – S. 134–138.

13. Zatulovskij A. S. Texnologiya otrymannya pichnym naplavlennyam kompozycijnyx sharuvatyx materialiv z funkcionalnym trybotexnichnym sharom, yaki zmicneni nanorozmirnymy karbidamy ta oksydamy / A. S. Zatulovskij, V. O. Shhereczkyj // Procesy lyttya. – 2019. – # 4. – S. 35–42.

14. Review of the Explosibility of Nontraditional Dusts / S. M. Worsfold, P. R. Amyotte, F. I. Khan et al. // Ind. Eng. Chem. Res. – 2012. – V. 51 (22). – P. 7651–7655.

15. Udovickij V. G. O terminologii, standartizacii i klassifikacii v oblasti nanotexnologij i nanomaterialov / V. G. Udovickij // Fizychna inzheneriya poverxni. – 2008. – # 1–2. – S. 193–201.

16. ISO/TR 11360:2010. Nanotechnologies – Methodology for the classification and categorization of nanomaterials (Nanotexnologii. Metodologija dlja klassifikacii i kategorizacii nanomaterialov).

17. Fastovecz P. M. Klasyfikaciya nanostrukturovanyx materialiv dlya inzheneriyi poverxni detalej mashyn / Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. № 3/5 (57). – 2012. – s. 19–25.

18. Vosstanovlenie kompressii v dvigateljah avtomobilej, motociklov i vodnogo transporta bez razborki dvigatelja [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://autotuning-service.com.ua/pages/keson.html>

19. Trybotexnichni materialy [Elektronnyj resurs]. Rezhym dostupu: <http://www.tsatu.edu.ua/tsst/wp-content/uploads/sites/6/lekcija-11-trybotehnichni-materialy-z-dyscypliny-trybotehnika-133-hm.pdf>

20. Dura Lube z SR3 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://zapchasti.ria.com/uk/dura-lube-s-sr-3-novaya-prysadka-v-dvygatel-dlya-legkovogo-avto-23555308.html>

21. Smazka MILITEC-1, 15 мл [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://roks.in.ua/mastilo-militec-1-15-ml>

22. Motorni olyvy SMARTOIL Nadijnyj захyst dvyguna [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupu: <https://megaforce.ua/uk>

23. Bogdanowicz R., Functionalized nanodiamonds as a perspective green carbo-catalyst for removal of emerging organic pollutants, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2022.100991>

24. Dolmatov V. Ju. Detonacionnye nanoalmazy: sintez, stroenie, svojstva i primeneniye [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: http://sktb-technolog.ru/detonation_nanodiamonds/

25. Tribotehnologija vosstanovlenija detalej mobil'noj s.-h. i transportnoj tehniki modifikaciej motornogo masla fullerensoderzhashhim sostavom / V. V. Aulin, A. D. Derkach, A. I. Burja [i dr.] // *Traktory i selhozmashiny*. – 2014. – № 4. – S. 26–29.

26. Vplyv chasu formuvannya syntezovanyx nanostruktur na morfologichni pokaznyky yix yakosti – zrostannya diametra por u nanostrukturovanomu pokrytti / Ya. O. Sychikova, N. I. Kosach, V. B. Bolshakov, G. O. Shyshkin // *Ukrayinskyj metrologichnyj zhurnal*. – 2020. – # 4. – S. 43–49.

27. Gomez-Perez A. *Ontologies: Theory, methods and tools*. Tutorial. The Fourth Summer School on Ontological Engineering and the Semantic Web, 2006 (SSSW'06).

28. Gruninger M., Atefi K., Fox M., *Ontologies to support process integration in enterprise engineering*, *Computational and Mathematical Organization Theory*, 6, pp. 381–394, 2000.

29. Gavrilova T. A., Horoshevskij V. F. *Bazy znanij intellektualnyh sistem*. SPb.: Piter, 2000. – 384 s.

30. Futrell, M. T. *The IDEF5 Application Procedure*. Master's Project Report. Department of Industrial Engineering, Texas A&M University, College Station, TX, 1991. – 187 p.

31. Vorobjov Yu., Nechyporuk M., Majorova K. *Zastosuvannya ontologichnyx system pidtrymky pryjnyattya rishen pry vybori texnologiyi ta zasobiv texnologichnogo osnashhennya dlya skladannya i remontu transportnyx zasobiv // Systemy i zasoby transportu. Problemy ekspluatatsiyi i diagnostyky: monografiya / Blatnický Miroslav, Dižo Ján, Gerlici Juraj ta in.; za nauk. red. prof. Grycyuka Igorya*. – Xerson: XDMA, 2019. – S. 395–408.

Надійшла в редакцію 14.12.2022, розглянута на редколегії 14.12.2022

Выбор трибологических наноматериалов для повышения износостойкости и долговечности механических контактирующих поверхностей деталей машин и механизмов на основе онтологической системы поддержки принятия решений

Объектом исследования являются трибологические наноматериалы (ТНМ), которые используются для повышения износостойкости и долговечности механических контактирующих поверхностей деталей машин и механизмов. Целью является создание систем поддержки принятия решений на основе онтологической системы при выборе ТНМ. Проведен анализ существующих исследований и публикаций по использованию ТНМ, которые присутствуют на рынке Украины и Европейских стран. Анализ показал, что ТНМ классифицируют по основным признакам и назначению работающих на трение поверхностей. Установлено, что использование ТНМ показывает значительный технический и

экономичный эффект, поскольку увеличивается срок эксплуатации изделия, уменьшается расход топлива за счет уменьшения коэффициента трения. Выявлено, что весомым признаком при выборе того или иного ТНМ должна являться экологичность производства и их использование на деталях машин и механизмов. Отмечено, что существует проблема существования обоснованных классификаторов ТНМ, поскольку их формирование отстает от динамики научно-технического прогресса. Обоснована целесообразность использования онтологической системы поддержки принятия решения (ОСППР) по выбору ТНМ для улучшения качества контактирующих поверхностей деталей машин и механизмов. Получены следующие результаты. Согласно анализу существующих современных и актуальных ТНМ и их характеристик установлены технологии по нанесению ТНМ: «КЕСОН» с заполнением микровпадин на поверхностях трения с образованием антифрикционных, износостойких и адгезионных пленок (покрытий), а также технологии использования кондиционеров металлов «Fenom», «ER», «SR3», присадок «Militec-1», которые продлевают срок эксплуатации без капитального ремонта и реметализантов «Lubriform» и «Мегафорс» с эффектом «неснашиваемости». Установлено, что главным недостатком таких ТНМ является загрязнение окружающей среды: питьевой, грунтовой и поверхностной воды. Решение экологического вопроса возможно за счет использования наноалмазов как специфического универсального нанокристаллического ТНМ, обладающего свойствами разложения вредных органических химикатов. Их представителями являются Lubriform Diamond Run Ln, Nanodiamond Green Run, наноприсадки Fenom Nanodiamond Green Run (на основе наноалмазов), Fenom Old Chap (на основе наночастиц бентонита), Renom Engine Nanoguard (для моторных масел) и «Renom Gear Nanoguard» (для трансмиссионных смазок). Для облегчения выбора ТНМ с целью улучшения качеств механических контактирующих поверхностей деталей машин и механизмов предложена ОСППР. Выводы. Научная новизна полученных результатов состоит в следующем: создан ОСППР, учитывающий признаки и характеристики ТНМ по потребностям заказчика, что сузит диапазон поиска и сократит время по его выбору. Приведенные материалы могут быть полезны при проведении теоретических и экспериментальных исследований по продлению ресурса и сроков эксплуатации деталей машин и механизмов машиностроительной отрасли.

Ключевые слова: трибологические наноматериалы; онтологическая система поддержки принятия решений; метаонтология; классификатор; контактирующие поверхности.

Analysis of tribological nanomaterials for improve wear resistance and durability of mechanical contact surfaces of machine parts and mechanisms based on an ontological decision support system

The object of research is tribological nanomaterials (TrNMs), which are used to improve the qualities of the mechanical contacting surfaces of mechanical components. The goal is to create Decision Support Systems (DSS) based on the ontological system when choosing the TrNM. It was carried out an analysis of existing studies and publications as to the use of TrNM, which are available on the

market of Ukraine and European countries. The analysis showed that TrNMs are classified according to the friction surfaces main features and their purpose. It has been determined that the use of TrNM shows a significant technical and economic effect, as the product service life extends and also fuel consumption decreases due to the reduction of the friction coefficient. It was found that an important consideration when choosing that or another TrNM should be their sustainability, in terms of their environmentally friendly manufacturing and use on mechanical components. It is noted that there is a problem of the existing TrNM classifiers and their substantiating, since their formation lags behind the dynamics of scientific and technological progress. It was reasoned expediency of using an Ontology-Based Decision Support Systems (OBDSS) regarding the selection of TrNM for improving the performances of the mechanical components contacting surfaces. The following results were obtained. According to the analysis of the current interest modern TrNMs and their characteristics, the technologies for the TNMs applying have been considered: "KESON" with the filling of on the friction surfaces micro-valleys with the formation of anti-friction, wear-resistant and adhesive films (coatings), as well as technologies for the use of metal conditioners "Fenom", "ER", "SR3" and "Militec-1" additives, which extend the product service life without overhauls, and remetalizing agents "Lubrifiilm" and "Megaforce" with their effect of "non-wear-out-ability". It was found that the main disadvantage of such TrNMs is a pollution of the environment, namely of drinking, ground and surface water. The solution to the environmental issue is possible due to the use of nanodiamonds as a specific universal nanocarbon TrNM, which has the properties of decomposition of harmful organic chemicals. Their "representatives" are "Lubrifiilm Diamond Run Ln", "Nanodiamond Green Run", nano additives "Fenom Nanodiamond Green Run" (based on nanodiamonds), "Fenom Old Chap" (based on bentonite nanoparticles), "Renom Engine Nanoguard" (for motor oils) and "Renom Gear Nanoguard" (for transmission oils). To facilitate the choice of TrNM for improving the performances of the mechanical components contacting surfaces, the OBDSS is proposed. Conclusions. The scientific novelty of the obtained results is as follows: it has been created the OBDSS, which takes into account the peculiarities and characteristics of TrNM according to the customer needs, which able to narrow the search range and reduce the time for TrNM selection. The presented materials can be useful when conducting the theoretical and experimental studies on the mechanical components service life in the field of mechanical engineering.

Keywords: tribological nanomaterials; ontological decision support system; metaontology; classifier; contact surfaces.

Відомості про авторів

Сікульський Валерій Терентійович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри технології виробництва літальних апаратів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: v.sikulskiy@khai.edu, тел. 050.529.6929, Scopus 57196123305, ORCID 0000-0002-5944-4728

Майорова Катерина Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри технології виробництва літальних апаратів, Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: kate.majorova@ukr.net, тел. 095.050.8155, Scopus 57204427689, ORCID 0000-0003-3949-0791

Воробйов Юрій Анатолійович – доктор технічних наук, доцент,

професор кафедри технології виробництва літальних апаратів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: i.vorobiov@khai.edu, тел. 050.291.4547, Scopus 57205383504, ORCID 0000-0001-6401-7790

Застела Олександр Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри технології виробництва літальних апаратів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: sastela@khai.edu, тел. 050.643.5896

Агарков Віктор Васильович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, заступник генерального директора із стандартизації Державного підприємства «Харківський регіональний науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації», м. Харків, Україна, e-mail: yahoninaalla@gmail.com, тел. 050.323.9249, Scopus 57207759758

About the Authors

Sikulskiy Valeriy – Doctor of Technical Science, Associate Professor, Professor at the Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: v.sikulskiy@khai.edu, Tel. 050.529.6929, Scopus 57196123305, ORCID 0000-0002-5944-4728

Maierova Kateryna – PhD, Associate Professor, Head of the Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: kate.majorova@ukr.net, Tel. 095.050.8155, Scopus 57204427689, ORCID 0000-0003-3949-0791

Vorobiov Iurii – Doctor of Technical Science, Associate Professor, Professor at the Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: i.vorobiov@khai.edu, Tel. 050.291.4547, Scopus 57205383504, ORCID 0000-0001-6401-7790

Zastela Oleksandr – Doctor of Technical Science, Associate Professor, Professor at the Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: sastela@khai.edu, Tel. 050.643.5896

Agarkov Viktor – PhD, Senior Research Fellow, Deputy CEO of standardization issues, State Enterprise “Kharkiv Regional Research and Production Center for Standardization, metrology and certification”, e-mail: yahoninaalla@gmail.com, Tel. 050.323.9249, Scopus 57207759758