

doi: 10.32620/oikit.2023.97.04

УДК 621.4-24:620.3:539.92

В. Т. Сікульський, К. В. Майорова,
О. К. Горлов, Ю. А. Воробйов, В. Л. Малашенко, В. В. Агарков*

Огляд механічних властивостей нанокompозитів на предмет їх використання у парах ковзання механізмів авіатехніки

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

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

Об'єктом огляду є полімерні нанокompозити (ПНК), які використовують для підвищення зносостійкості і довговічності механічних контактуючих поверхонь деталей машин і механізмів. Метою є аналіз одержання та механічні властивості ПНК при їх використанні в вузлах конструкцій літаків і вертольотів, що працюють в парах ковзання з великим ресурсом. Аналіз існуючих досліджень і публікацій з використання ПНК показав, що застосування нанокompозитів з пластмасовою основою можна рекомендувати для виготовлення трибологічних пар деталей авіатехніки. Встановлено, що більшість авторів серед розглянутих нанодобавок перевагу надають наноалмазам з концентрацією в діапазоні 1...3 %, які в порівнянні з усіма іншими наноматеріалами дають стабільно позитивний результат, а також мають хороші екологічні показники. Виявлено, що для деталей пар тертя можна забезпечити коефіцієнт тертя близько 0,1 за рахунок застосування композитних полімерів з НА. Отримані такі результати. Виконаний огляд дозволить створити нормативну базу наноматеріалів, необхідну для вирішення конструктивно-технологічних рішень в парах ковзання авіаційної техніки. Згідно аналізу існуючих сучасних і актуальних ПНК і їх одержання, встановлено, що для нанокompозиту титану Тi/НА з вмістом 0,35 % НА можна забезпечити коефіцієнт тертя 0,12. Показано, що при гальванічному нанесенні нанопокриттів на сталі з концентрацією наноалмазів у розчині 8,0 г/л та щільності струму 3,0 А/дм² можна забезпечити твердість композитного покриття з максимальним значенням 5,302 ГПа та середнім розміром зерна 4 нм. Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: проаналізовані технології одержання та основні механічні властивості ПНК при їх використанні в парах ковзання деталей авіатехніки. Виявлено, що в існуючих публікаціях недостатньо наведена інформація про важливі параметри отриманих матеріалів, як термостійкість, вологостійкість, екологічність та інше. Висновки. Рекомендовано апробацію НА з концентрацією в діапазоні 1...3 % на трибологічних деталях авіатехніки, а також в парах ковзання з великим ресурсом. Проте, незважаючи на унікальні механічні властивості нанокompозитів, нормативна база щодо проектування пар ковзання потребує додаткові дослідження та експерименти.

Наведені матеріали можуть бути корисними при проведенні теоретичних і експериментальних досліджень з продовження ресурсу, експлуатації та ремонту деталей літаків та вертольотів.

Ключові слова: полімерні нанокompозити; наноматеріал; наноалмаз; трибологічні пари; авіаційне виробництво.

Вступ

Полімерні нанокompозити (ПНК) – це новий клас армованих гібридних матеріалів, які створюються шляхом диспергування нанорозмірних частинок у

полімерну матрицю. Технологія виробництва полімерних композитів є актуальною областю науки про полімери, яка протягом останніх років змістила свій інтерес в бік нанорозмірних наповнювачів і дозволила створити нанокompозити на основі полімерної матриці. За сучасним визначенням нанотехнології — це технології, що розроблені для об'єктів із розмірами, меншими за один мікрон, і дають змогу проводити дослідження, маніпуляції та обробку речовин, один з характерних розмірів яких лежить у діапазоні розмірів від 0,1 до 100 нанометрів. Основою наноматеріалів є наночастинки, розміри яких у мільярд разів менші від 1 м, або в мільйон разів менші від 1 мм. Це конкретне уявлення про нанотехнологію поставило чітку межу з технологіями, які зараз нанотехнологіями не вважаються. В залежності від геометричних розмірів зерен матриці та частинок іншої фази нанокompозити класифікують на [1-2]: нульвимірні (0 D: кластери, наночастинки, коллоїди, квантові крапки) (рис. 1, а); одновимірні (1 D: нанотрубки, волокна, прутки) (рис. 1, б); двовимірні (2 D: тонкі плівки, шари) (рис. 1, в); об'ємні – тривимірні (3 D: полікристали) (рис. 1, г); фрактальні ($1 < D < 2$, $2 < D < 3$: фрактальні кластери і нитки) (рис. 1, д).

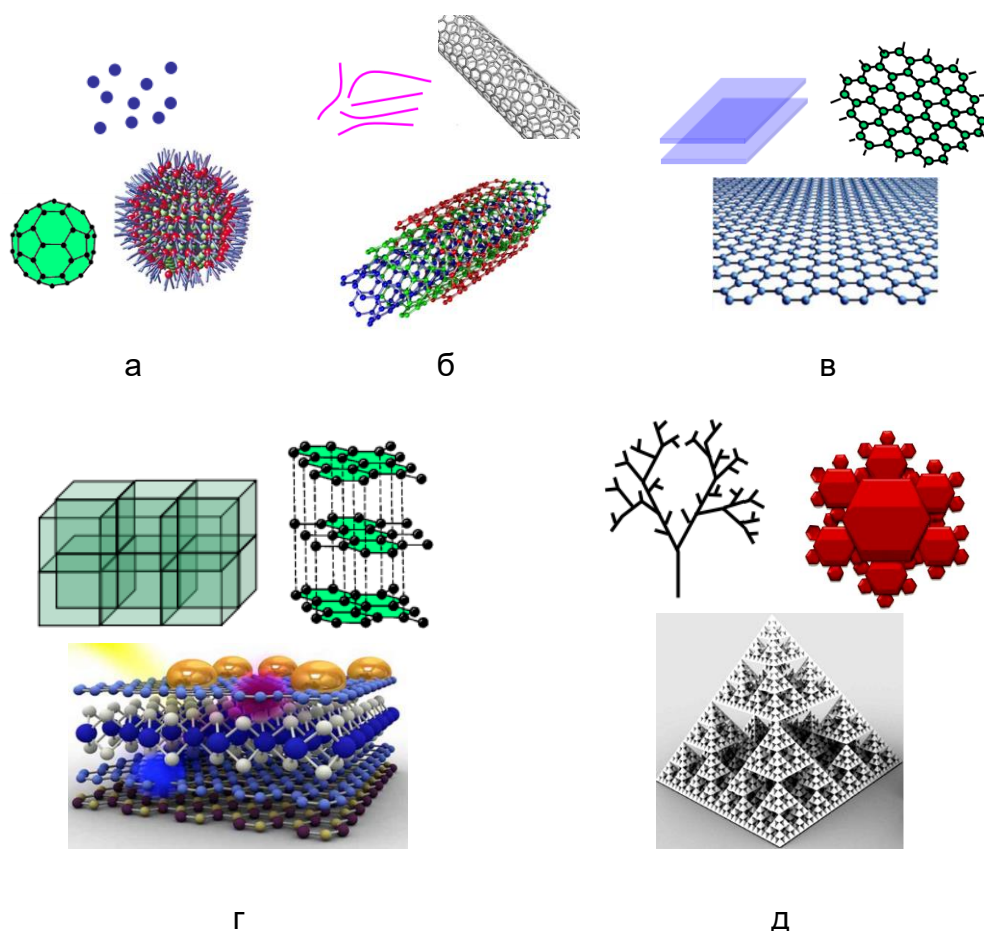


Рис. 1. Класифікація форм армувальних об'єктів нанокompозитів в залежності від розмірів зерен матриці та частинок іншої фази: а – нульвимірні, б – одновимірні, в – двовимірні, г – об'ємні, д – фрактальні

За складом матриці нанокompозити розподіляють на три групи [1]: з керамічною матрицею; з металевою матрицею та полімерно-матричні

нанокompозити. Серед цих груп останні мають ряд переваг за своєю технологічністю використання особливо при виготовленні нових виробів [3].

Можна сказати, що ПНК поєднують в собі концепції структур композитів та наноматеріалів. В цьому випадку нанокompозит розуміють як тверду комбінацію нанорозмірних фаз (пористе середовище, коллоїди, гелі та сополімери), які відрізняються за властивостями в структурі та хімічному складі. Важлива особливість нанокompозитів полягає в тому, що поліпшення властивостей досягається при дуже низьких концентраціях армуючих наповнювачів (як правило $\leq 5\%$ мас.) і сильно залежить від ступеня дисперсності нанонаповнювача та міжфазної адгезії «нанонаповнювач – матриця» [4, 5]. Це викликано великою площею (в об'ємному співвідношенні) поверхні нанодомішки в порівнянні з мікро- і макродомішками. Також це обумовлено тим, що нанорозмірні органічні та неорганічні матеріали змішані в нанокompозиті майже на молекулярному рівні і мають наступні переваги [6]:

1. Покращені механічні властивості (наприклад, забезпечення міцності та модулю пружності з забезпеченням стабільності розмірів).
2. Знижена проникність для газів, води та вуглеводнів.
3. Поліпшена термічна стабільність та температура теплової деформації.
4. Знижений коефіцієнт теплового розширення.
5. Підвищена вогнестійкість та зниження викидів диму.
6. Поліпшена хімічна стійкість.
7. Вища електропровідність та ін.

За даними американської компанії «Grand View Research» світове виробництво ПНК у період з 2014 року стрімко зростає завдяки збільшеному інтересу і попиту з боку народно-господарських галузей саме через властивості таких нанокompозитів [7]. На сьогодні розробка таких новітніх полімерних нанокompозитів (ПНК) є актуальною задачею як прикладної, так і фундаментальної наук і відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки України.

Отже, область з розроблення ПНК із необхідними властивостями знаходиться у стадії інтенсивного розвитку, що створює актуальність та перспективність задачі дослідження в цьому напрямку.

Стан проблеми

ПНК з їх безпрецедентним поєднанням властивостей та винятковими дизайнерськими можливостями зарекомендували себе як високоефективні матеріали двадцять першого століття та наразі все більше і більше використовуються і у авіабудуванні [8]. Звісно про дослідження та проектування металевих пар ковзання, які виготовляються також з використанням нанотехнологій та мають деякі переваги при застосуванні у конструкції літальних апаратів [53,54].

Використання ПНК замість металевих задовольняє вимогам, які пов'язані зі зменшенням маси літака та питомої витрати палива при забезпеченні високої питомої міцності і твердості, жароміцності, зносостійкості, теплозахисних властивостей тощ.

Звісно про застосування вуглецевих нанотрубок (ВНТ) у конструкціях літака Boeing 787 [9]. Додавання ВНТ (1–2 %, а іноді навіть 0,1–0,3 %) суттєво збільшують модуль пружності та міцність на розрив [10], при цьому підвищуються теплопровідність, електропровідність та діапазон робочих температур композитів, завдяки підвищенню температури переходу у склоподібний стан. Це пояснюють тим, що наночастинки впливають на формування надмолекулярної полімерної структури композитів, і тому так суттєво можуть покращувати властивості матеріалу.

Наночастинки металів, оксиди металів та оксиди неметалів використовуються в нанокompозитах як армуючі компоненти. Серед таких часток оксидів металів зазвичай використовують TiO_2 , SiO_2 , наноалмази та ін. [5]. Їх додають у нанокompозити для отримання механічної міцності, електро- та теплопровідності, бар'єрного ефекту, антибактеріального ефекту, захисту від УФ-випромінювання та властивості самоочищення.

Звісно про використання таких матеріалів при виробництві нерухомих пар конструкції літальних апаратів, які значно поліпшують міцність з'єднань, втомну довговічність, знижують фретинг-корозію за рахунок застосування полімерних наповнювачів [23-25].

Особливу увагу заслуговує застосування нанокompозитів з пластмасовою основою для виготовлення деталей конструкції літальних апаратів, у тому числі для трибологічних пар, що працюють при помірних навантаженнях з низьким коефіцієнтом тертя. В цьому випадку спостерігається покращення трибологічних властивостей при експлуатації таких деталей, а також безвідмовність роботи механізмів [11].

Однак, ступінь досягнення необхідних механічних властивостей ПНК залежить від багатьох факторів, зокрема від типів полімерної матриці та наночастинок (ВНТ, наночастинки металів, оксиди металів, оксиди неметалів тощо), кількості домішок, співвідношення розмірів наночастинок, взаємодії «полімер-наповнювач», ступеня розподілу та орієнтації в композиті наповнювача, параметрів формування композиту тощо.

Тому особливо актуальним є проведення досліджень з одержання і аналізу механічних властивостей нанокompозитів і потребує створення упорядкованості щодо їх використання в парах ковзання.

Мета дослідження

Метою даного огляду є систематизація найбільш важливих результатів, отриманих на сьогодні при експериментальних і теоретичних дослідженнях сукупності механічних властивостей нових нанокompозитів, а саме для використання в вузлах конструкцій літаків і вертольотів, що працюють в парах ковзання з великим ресурсом.

Стан питання в світі та аналіз літературних джерел

Світові виробники нанокompозитів. Основними виробниками нанокompозитних матеріалів є «Plasma X», «Zyvox Technologies», «Powdermet Inc.», «DSM», «Inframat Corporation», 40 «DuPont», «BASF», «Cabot», «eSpin Technologies» «Plasmachem GmbH», «Arkema», «InMat» та «BASF». Найбільше

переліченими компаніями виробляються нанокompозитні матеріали на основі вуглецевих нанотрубок, глини, оксидів металів, тощо [5-7].

Основними провідними світовими виробниками на ринку наночастинок оксидів металів є «Nanoparticles & Microspheres Eprui Co.», «American Elements», «Reinste Nanoventures», «NanoScale Corporation», 39 «Altair Nanomaterials», «Sigma Aldrich», «US Research Nanomaterials Inc.» і «Access Business Group» [5]. У промислових масштабах синтезуються наночастишки таких оксидів металів: оксид алюмінію, оксид вісмуту, оксид сурми, оксид церію, оксид магнію, оксид купруму, оксид марганцю, оксид силіцію, оксид титану, оксид феруму, оксид стануму, оксид цирконію, оксид цинку тощо. У екологічному напрямку активно використовуються тільки нанодисперсні порошки TiO_2 (як фотокаталітичний матеріал). Відомими виробниками TiO_2 фотокаталізаторів є «Evonik» (Німеччина), «Nano-Oxides Inc.» (Великобританія), «NANO Technology» (Китай) тощо [7].

В Україні з 2009 року була започаткована державна наукова та технічна програма «Нанотехнології та наноматеріали», внаслідок чого інститути НАН України та університети розпочали активні дослідження з нанотехнологій та наноматеріалів. Детальний аналіз діяльності наукових інститутів НАН України та університетів, залучених до цієї програми, демонструє те, що найвищий потенціал розвитку технологій знаходиться у сферах нанохімії, нанофізики та нанобіотехнологій [5, 12]. Серед досліджень, що за державної підтримки проводяться українськими науково-дослідними інститутами, можна відмітити технологію, що знайшла практичне використання в екологічній сфері. Це установка для очищення висококонцентрованих водних об'єктів із використанням ультрадисперсних фаз гідроксидів феруму [5, 7, 12]. Окрім цього, в Україні, розроблено науково-дослідні технології синтезу нанопорошків простих і складних оксидних фаз, зокрема, цирконію (IV) оксиду, титану (IV) оксиду, титанату барію тощо [5]. Авторами цих розробок є Інститут проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича НАН України. Тим не менш, використання таких нанопорошків спрямовано більшою мірою на біомедичні та технічні області застосування. Також відомі розробки щодо одержання сорбційних матеріалів на основі ZrO_2 та інших оксидів методом гомогенного осадження і плазмохімічним методом [4-5, 10]. Дані дослідження було розвинуто науковцями ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет».

Певний вклад в розвиток впровадження нанотехнологій в конструкції літальних апаратів внесли науковці Національного аерокосмічного університету «ХАІ»: Костюк Г.І., Баранов О.О., Долматов А.І. та інші [13-18].

Згідно даних роботи [11], відповідно аналізу існуючих сучасних і актуальних наноматеріалів та їх характеристик вітчизняних і іноземних виробників, можна виділити наступні технології з нанесення наноматеріалів: «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 реметалізацій «Lubrifiilm» і «Мегафорс» з ефектом «незношуваності». Однак головним недоліком таких матеріалів 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 «Lubrifiilm 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).

Методи синтезу наноматеріалів та нанокомпозитів на основі оксидів металів. Вирішальну роль у формуванні властивостей магнітних, сорбційних, (фотокаталітичних, оптичних, електричних тощо) нанокомпозитів має метод синтезу наноматеріалів, який дозволяє одержувати наночастинки певних розмірів і форми. Метод синтезу впливає не тільки на розмір і форму частинок, але й на ступінь кристалічності, наноструктурність, морфологію, структурно-сорбційні характеристики тощо [4, 8-10].

Досить широке використання у наукових дослідженнях знайшли методи гідротермального синтезу, хімічного осадження, золь-гель технології або так звані методи «м'якої хімії» [4, 5], що пов'язане з порівняно простотою їх проведення, широким колом параметрів керування, таких як концентрація реагентів та тривалість процесу, тиск і температура тощо. Крім того, отримання металоксидних продуктів з більш різноманітними властивостями стає можливим при комбінуванні цих методів між собою або використанні різних додаткових способів обробки композитів. Наприклад, надвисокочастотне випромінювання або ультразвук застосовують з основними методами синтезу для впливу на певні властивості наночастинок оксидів металів: розмір, питома поверхня, морфологія, сорбційна ємність тощо. Ультразвукова обробка дає можливість уникнути агрегації частинок, що утворюються, а також забезпечити високий рівень їх гомогенності [4, 19-20]. У випадку коли пріоритетним є отримання монокристалів високого ступеня кристалічності, раціонально застосовувати метод газофазного синтезу, який забезпечує одержання монокристалічних наночастинок оксидів металів різноманітної і контрольованої морфології [4-5, 21-22] при відносній простоті, високій продуктивності та доступності методу. Поряд з цим є багато інших методів отримання металоксидних наночастинок, такі як електрохімічний, піроліз аерозолів, електроспінінг. Слід зазначити також екологічні методи або так звані «green» технології, які активно пропонуються, але поки що використовуються або для вузько специфічних застосувань, або розробка яких знаходиться ще на початковому етапі лабораторних досліджень [5]. Серед наведених способів синтезу, що дозволяють одержувати наночастинок оксидів металів, привертають увагу такі способи як: хімічне осадження, сольво-термальний або гідротермальний, золь-гель та газофазний синтез.

Досвід використання нанокомпозитних матеріалів.

Була помічена здатність деяких пластмас утворювати з наноалмазами високоміцні сполуки, які мали чудові властивості. Дослідження цього напряму відбито у низці робіт [26-31].

У [32] представлено дослідження трибологічних характеристик поліаміду 6 та армованого вуглецевим волокном поліаміду 6 (ПА6) (CF/PA6) з різним їх вмістом в умовах сухого ковзання. Досліджено вплив вмісту вуглецевого волокна на трибологічні властивості композитів. Морфологія зношеної поверхні чистого ПА6 та його композитів була досліджена за допомогою електронної скануючої мікроскопії, і були встановлені механізми зносу. Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що всі наповнені поліаміди 6 мають кращі трибологічні характеристики, ніж ненаповнені поліаміди 6. Оптимальне зниження зносу досягається при вмісті вуглецевого волокна 20 об.%.

Саме механічні характеристики нових матеріалів, у тому числі трибологічні характеристики значно підвищили інтерес до досліджень у цій галузі, що підтверджується низкою наступних робіт. У статті [33] за допомогою електронної скануючої мікроскопії системно вивчалось поліпшення

трибологічних властивостей ПА6 з різними наповнювачами, наприклад, тальком, скловолокном (СВ), твердими мастилами комбінованими типу графіту, поліетилену надвисокої молекулярної маси. Результати показали, що СВ може знижувати коефіцієнт тертя та швидкість зношування чистого ПА6 більш ефективно, ніж тальк, а оптимальний вміст становить 15% мас. Коефіцієнт тертя та швидкість зношування збільшувалися зі збільшенням навантаження, за винятком швидкості зношування композиту з 20 і 25 мас.% СВ, яка зменшувалася зі збільшенням навантаження.

Більш детально трибологічні якості було представлено у дослідженнях роботи [52] на композитах з поліаміду-6, армованого нано- Al_2O_3 та мікронами Al_2O_3 (ПА6/ Al_2O_3), що були отримані методом полімеризації на місці. Вплив вмісту наночастинок та стану зносу на трибологічні властивості композитів вимірювали за допомогою вимірювача зносу блоку на пристрої ММ-200. За допомогою скануючого електронного мікроскопа та металургійного мікроскопа досліджено зношену поверхню та запропоновано модель механізму зношування.

Встановлено, що нано- Al_2O_3 підвищує зносостійкість мономерного лиття поліаміду-6 при оптимальному вмісті нано- Al_2O_3 близько 3 мас. %. Швидкість зношування нанокompозиту ПА6/ Al_2O_3 була нижчою, ніж у композиту з мікронним Al_2O_3 , і повільно збільшувалася, тоді як його коефіцієнт тертя поступово зменшувався з навантаженням. Однак коефіцієнт тертя композиту був дещо вищим, ніж у мономерного ливарного поліаміду 6, і нижче, ніж у композиту з мікронним Al_2O_3 .

У дослідженні [34] високоенергетичні наноалмази, подрібнені в кульовому млині (МНА), ретельно обробляються низькотемпературним відпалом та змішаними кислотами для отримання карбоксильованих МНА (кМНА). У ході цього процесу не тільки видаляються домішки, але й прищеплюються функціональні групи, що містять кисень поверхні МНА. Потім нанокompозити отримують полівініловий спирт (ПВС)/цМНА методом лиття з водного розчину. Встановлено, що температура склування (T_g) та пікова температура коефіцієнта втрат (T_{tand}) нанокompозитів ПВС/кМНА зміщені у бік вищих значень, ніж чистого ПВС. Це дозволило встановити наступне. Термічне розкладання ПВС явно пригнічується цМНА. Початкова та максимальна температура розкладання зростає більш ніж на 17°C та 24°C відповідно. Термальна провідність зростає на 57,5%. Крім того, межа міцності при розтягуванні та модуль Юнга ПВС покращуються на 62,3% та 166,7% відповідно при додаванні цМНА. Таке значне поліпшення механічних характеристик поставило завдання широкого дослідження і використання наноматеріалів у конструкції машин і механізмів, де в роботі [35] були синтезовані та оцінені полімерно-матричні композити ПВС, армовані невеликими концентраціями функціоналізованого НА. Детальна структурна характеристика з використанням різних аналітичних методів показала, що наночастинки розподілені рівномірно та не злипаються. У статті [35] зроблено припущення, що наночастинки тісно взаємодіють з полімерною матрицею, суттєво збільшуючи кристалічність. Показники механічних властивостей композитів ПВА-НА, визначені методом наноіндентування, мали значні покращення, а саме для твердості та модуля Юнга ПВА-НА при додаванні лише 0,6 мас. % НА, що є відносно невеликим, але суттєвим. Було висловлено припущення, що відмінна адгезія між матрицею і

функціоналізованими частинками є основною причиною такого помітного поліпшення механічних характеристик. Ці результати показують, що можна з успіхом використовувати як наповнювач для виготовлення композитних полімерів.

У статті [36] розглядаються дослідження, проведені на двох важливих нанокompозитах полімер/НА, тобто на нанокompозитах поліаміда/НА (ПА/НА) та на нанокompозитах поліімід/НА (ПІ/НА). Особливу увагу було приділено дизайну, синтезу, властивостям та застосуванню цих важливих нанокompозитів. Площа поверхні, твердість, провідність, оптична прозорість, хімічна інертність та теплопровідність НА були поєднані з основними характеристиками ПА та ПІ, що призвело до численних технічних застосувань. Чудові армуючі властивості та високі характеристики нанокompозитів ПА/НА та ПІ/НА були досягнуті завдяки включенню до матриці функціональних або модифікованих НА. Отже, покращена міжфазна взаємодія між ПА/ПІ та наночастинками та тонкою дисперсією нанонаповнювача може призвести до оптимальних властивостей цих нанокompозитів для ряду високотехнологічних додатків, від аерокосмічної області до електроніки та біомедицини.

Проблеми досліджень, властивостей та застосування полімерних нанокompозитів докладно викладені також у роботах [37-41].

У дослідженні [42] представлений метод виготовлення армованих композитних НА покриттів з гідроксиапатиту (ГА) на металевих деталях. Покриття із ГА мають погані механічні властивості, які можна покращити за рахунок включення вторинного біоінертного армуючого матеріалу. Наноалмаз (НА) має відмінні механічні властивості, щоб відігравати роль армуючого матеріалу для поліпшення механічних властивостей крихкого ГА біокерамічне покриття. Основна стала проблема полягає в розробці належних методів осадження для виготовлення покриттів НА, армованих НА. У цьому дослідженні описано нанесення шляхом плазмового напилення сумішей суспензії НА та вихідного порошку ГА мікронного розміру. Вплив армування НА на мікроструктуру та механічні властивості покриттів, таких як твердість, адгезійна міцність і коефіцієнт тертя були досліджені. Результати показали, що покриття з ГА, армовані НА, демонструють меншу пористість, меншу кількість нерозплавлених частинок та однорідну мікроструктуру. Можна зробити висновки, що у роботі [42] представлено багатообіцяючий підхід виготовлення армованих НА композитних покриттів з ГА на металевих деталях, але потребує подальших досліджень і експериментів.

Проблема нанесення нанопокриття виробу описано також у роботі [43]. Нанокompозити титану (Ті)/(НА) із потенціалом для біомедичних застосувань були отримані методом іскрового плазмового спікання. За допомогою рентгенівської дифракції, скануючої електронної мікроскопії, електронної мікроскопії, що просвічує, і механічного аналізу були досліджені нанокompозити Ті/НА, і показано вплив НА на мікроструктурні та механічні властивості титанової матриці. Експериментальні результати показали, що нанокompозити Ті/НА демонструють чисту фазу α -Ті з концентраціями від 0,1 до 0,35 мас.% і з фазою нано-ТіС, сформованою на місці, в 0,5–2,0 мас. % НА. Твердість при наноіндентуванні, модуль Юнга і межа плинності при стисненні нанокompозитів Ті/НА були значно покращені, оскільки було включено в матрицю Ті. Поліпшення твердості (60,2%), модуля Юнга (27,4%) та межі плинності на стиск (24%) були досягнуті за рахунок легування 0,5 мас.% НА матрицю Ті, але за рахунок зменшення пластичності.

Нанокompозити Ті/0,35 мас.% НА мають кращі комплексні механічні властивості. Ці поліпшення можуть пояснюватися визначними механічними

властивостями НА, однорідною дисперсією нанокластерів НА, зміцненням Орована НА/nano-TiC та зміцненням твердого розчину атомами вуглецю в нанокompозитах Ti/НА.

Вплив концентрації наноалмазів і щільності струму електроліту на текстуру та механічні властивості покриття сталі з композиту Ni/НА досліджувалося у роботі [44]. Композитне покриття Ni/НА наносили на вуглецеву сталь у традиційній установці Уатта розчином без добавок за допомогою гальванічного покриття постійним струмом (DC). Вплив концентрації наноалмазу та щільності струму в гальванічному розчині на морфологію, розмір зерна та текстуру композитного покриття Ni/НА спостерігали за допомогою дифракції рентгенівських променів (XRD) та скануючої електронної мікроскопії (SEM). Розподіл частинок наноалмазів у композиційному покритті було досліджено за допомогою спектрів комбінаційного розсіювання та SEM. Механічні властивості композитного покриття, такі як модуль пружності і твердість досліджували за допомогою нанометрового індентора (XP) тестової системи. Коефіцієнт тертя визначали за допомогою універсального мікротриботестера. Отримані результати продемонстрували, що краща орієнтація композитного покриття Ni/НА варіювалася від кристалічної орієнтації покриття з нікелю чистого до кристалічної орієнтації, коли концентрація наноалмазів у гальванічному розчині була 8,0 г/л, щільність струму 3,0 А/дм², твердість композиційного покриття досягала максимального значення 5302 ГПа, а коефіцієнт тертя підтримувався на рівні близько 0,1. Середній розмір композиційного зерна покриття зменшився до 20,4 нм. У [45-47] продемонстровано аналогічні позитивні результати щодо створення аналогічних покриттів, що підтверджує їх доцільність і необхідність в технологічних цілях.

У роботі [48] описано застосування нанокристалічного алмазу, синтезованого детонаційним синтезом виготовлення електрода. Підвищена електропровідність НА, обумовлена особливостями гігантської питомої поверхні та великою кількістю поверхневих дефектів, а також кластерною структурою, що дозволяє використовувати його як електродний матеріал. Були виготовлені електроди з наноалмазного порошку, які досліджувалися за допомогою циклічної вольтамперометрії та вимірювання імпедансу змінного струму. Результати показали, що електрод порошку наноалмазу електрохімічно стабільний в електролітах KCl в широкому діапазоні потенціалів (-1,2...2,0 В). Електродна реакція є квазіоборотною в розчині 0,1 моль/л KCl, що містить окислювально-відновну пару фериціанід-фероціанід. Константа швидкості електродної реакції k оцінюється як $2,87 \times 10^{-3}$ см/с. Проаналізовано спектри імпедансу змінного струму та запропоновано еквівалентну схему. У статті зроблено висновок про доцільне застосування нанокристалічного алмазу для виготовлення електродів.

У дослідженні [49] було виявлено, що включення наноалмазу, що містить карбоксильну групу (НА-COОН), значно знизило питому знос (~30 %) і коефіцієнт тертя (~60 %) поліаміду 6 (ПА6) при завантаженні 1 мас. %. У порівнянні з НА-COОН, НА, функціоналізований аміногрупами, додатково підвищує зносостійкість ПА6, що було пов'язано з його більш тонкою дисперсією, а також з більшим впливом на поліпшення механічних властивостей, міцність та кристалічність ПА6. Приріст температури поверхні, викликаний теплою тертя, добре узгоджувався з коефіцієнтом тертя та характеристиками зношування зразків. Зображення оптичної мікроскопії показали, що сприяють механізму абразивного зносу в композитах ПА6/НА.

У той час як наноалмаз став одним з найбільш поширеним з наноматеріалів, що вивчається, досягнення великої частки алмазних

наночастинок в полімерному покритті залишається невирішеною проблемою. Так в роботі [50] були продемонстровані полімерні нано- та мікрволокна, що містять високі завантаження алмазних частинок розміром 5 нм (до 80 мас. % у поліакрилонітрилі та 40 % у поліаміді-11), з використанням електроформованих нановолокон як носій. Електроформовані нановолокна з високим вмістом наноалмазу в полімерах (20% наноалмазу в поліаміді 11) сплавлялися в тонкі прозорі плівки, дослідження яких показали їх високі механічні властивості, а саме: підвищення модуля Юнга в 4 рази, а твердості в 2 рази. Створення таких плівок стає корисним при необхідності забезпечити захист від ультрафіолету та стійкості до подряпин на різних поверхнях, особливо в тих випадках, коли поєднуються механічні, теплові та діелектричні властивості.

У роботі [51] навпаки показані результати досліджень трибологічних і механічних властивостей нанокомпозитів на основі епоксидної смоли, армованих частинками НА з низьким вмістом. Наведено послідовне зростання значень твердості та значне зниження показників швидкості зношування та коефіцієнта тертя. Встановлено, що додавання лише 0,1 мас. % НА знижує коефіцієнт тертя та швидкість зношування на 50 та 84 % відповідно. Крім того, незважаючи на покращення механічних властивостей епоксидної смоли при вмісті 0,1 мас. % НА, додавання більшої кількості нанонаповнювачів перешкоджало подальшому поліпшенню властивостей як трибологічних, так і механічних.

Вплив та покращення трибологічних властивостей композитів від додавання НА не більше 3 мас. % доведено і іншими роботами [26-31].

Обговорення результатів

У розглянутих роботах [23-52] відзначається суттєве підвищення механічних властивостей за невеликої кількості нанодобавки. У той же час виконати адекватний порівняльний аналіз отриманих даних щодо механічних та трибологічних властивостей для різних матеріалів публікацій [23-54] достатньо важко тому, що автори використовують методики досліджень, обладнання та вимірвальні засоби виходячи з їх можливостей та галузі застосування результатів.

В той же час основні параметри необхідні для використання у парах ковзання показують значний рівень, який задовольняє за своїм значенням. Так в роботі [43] твердість при наноіндентуванні, модуль Юнга і межа плинності при стисненні нанокомпозитів Ті/НА були значно покращені, оскільки НА було включено в матрицю Ті. Поліпшення твердості (60,2%), модуля Юнга (27,4%) та межі плинності на стиск (24%) були досягнуті за рахунок легування 0,5 мас.% НА матриці Ті, при цьому відбулося зменшення пластичності.

Результати досліджень основних показників механічних властивостей наноматеріалів, що вивчались авторами, для наочності зведені в порівняльну таблицю 1.

В роботі [51] встановлено, що додавання лише 0,1 мас. % НА знижує коефіцієнт тертя та швидкість зношування на 50 та 84 % відповідно.

У наступних роботах є суперечливі дані щодо коефіцієнта тертя і за величиною зносу при додаванні НА. Так у роботі [35] зроблено висновок про те, що коефіцієнт тертя композиту дещо вищий, ніж у мономерного ливарного поліаміду 6, і нижче, ніж у композиту з мікронним Al_2O_3 . Зображення оптичної мікроскопії зі статті [34] показали, що додавання НА сприяють механізму абразивного зносу в композитах ПА6/НА, хоча не описано, як визначався знос зразків. У той самий час більшість інших авторів [27, 33, 37] у своїх дослідженнях відзначають зниження зносу і коефіцієнту тертя.

Таблиця 1. Показники основних механічних властивостей наноматеріалів

Склад композиту [джерело]	Оптимальний вміст наповнювача	Зростання межі міцності при розтягуванні	Зростання модуля Юнга	Зростання твердості	Навантаження на теплопровідність	Коефіцієнт тертя
Поліамід 6+ вуглецеве волокно [32]	20 об. %	*	*	*	*	0,1
Поліамід 6+графіт [33]	15 мас. %	*	*	*	*	0,05
Поліамід 6+ нано-Al ₂ O ₃ [52]	3 мас. %	*	*	*	*	0,12
ПВА-НА [34, 35]	0,6 мас. %	+62,3 %	+166,7 %	*	*	*
ПА 11+НА [36, 50]	20 мас. %	+400 %	*	+200 %	*	Стойкість до подряпин
ПА66+НА [36]	3 мас. %	+12 %	+21 %	*	+7%	*
Покриття Ti/НА [43]	0,35 мас. % НА	Межа плинності на стиск+24 %	+27,4 %	+60,2 %	*	0,12
Покриття сталі з композиту Ni/НА [44]	концентрація наноалмазів у гальванічному розчині 8,0 г/л	*	*	5302 ГПа	*	0,1
Епоксидна смола+НА [51]	0,1 мас. %	*	*	швидкість зношування -84%	*	-50%

* – немає даних

Інші розглянуті роботи показують покращення механічних і трибологічних властивостей від застосування наноалмазів при створенні полімерних та металевих композитів. Особливістю є те, що це поліпшення досягається при дуже невеликих концентраціях наноалмазів (1...3 %). Однак, більшість авторів робіт відзначають, що підвищення концентрації наноалмазів (більше 3 %) не призводить до подальшого зростання механічних показників, а в ряді випадків призводить до їх зниження [51]. Слід зазначити, що цей факт дозволяє рекомендувати апробацію наноалмазів з концентрацією в діапазоні 1...3 % на деталях машин і механізмів, а також в парах ковзання з великим ресурсом.

Висновки

1. Виконані дослідження мають оглядовий характер і можуть бути використані в лабораторних і винахідницьких роботах, що дозволить створити нормативну базу наноматеріалів, необхідну для вирішення конструктивно-технологічних рішень в парах ковзання авіаційної техніки.

2. Аналіз механічних властивостей полімерних нанокомпозитів на предмет їх використання у парах ковзання показує, що нанокомпозити з пластмасовою основою за своїми механічними властивостями мають унікальні властивості за коефіцієнтом тертя, твердістю композитного покриття, модулем пружності, електропровідності та ін. Тому їх можна рекомендувати

використовувати для виготовлення пар ковзання у авіаційній техніці, зокрема для трибологічних пар, які працюють при помірних навантаженнях і при потрібному низькому коефіцієнті тертя.

3. Встановлено, що більшість авторів серед розглянутих нанодобавок перевагу надають наноалмазам з концентрацією в діапазоні 1...3 %, які в порівнянні з усіма іншими наноматеріалами дають стабільно позитивний результат, а також мають хороші екологічні показники.

4. При проектуванні пар ковзання слід враховувати, що для пар тертя можна забезпечити коефіцієнт тертя близько 0,1 за рахунок застосування композитних полімерів з наноалмазами за умови дотримання температурного режиму. Для нанокompозиту Ti/HA з вмістом 0,35 % маси HA коефіцієнт тертя можна забезпечити 0,12 відповідно до технології [37].

5. Розглянуто роботи авторів, присвячені нанесенню покриттів на сталі. Показано, що при дотриманні рекомендацій роботи [38] нанесення нанопокриттів на сталі з концентрацією наноалмазів у гальванічному розчині 8,0 г/л та щільності струму 3,0 А/дм² можна забезпечити твердість композитного покриття з максимальним значенням 5,302 ГПа та середнім розміром зерна 4 нм.

5. Аналіз виконаних досліджень дозволив виявити, що в існуючих публікаціях недостатньо наведена інформація про важливі параметри отриманих матеріалів, як термостійкість, вологостійкість, екологічність та інше, що край необхідно для використання в авіаційній техніці. Слід зазначити, що майже не існує даних щодо кількісної оцінки зносу пар тертя від застосування наноматеріалів, методик вимірювання зносу, що вимагає додаткових досліджень з визначення ресурсу виробу.

6. Отримані результати і підсумки з огляду механічних властивостей полімерних нанокompозитів на предмет їх використання у парах ковзання показав актуальність і необхідність наукового пошуку, досліджень і впровадження таких матеріалів у авіаційне виробництво.

Література

1. Введение в нанотехнологию [Електронний ресурс] / Режим доступу : http://web.kpi.kharkov.ua/ief/wp-content/uploads/sites/39/2016/07/nano_Termin_presentation1.pdf (12.01.2023).
2. Eric Wieser. CC BY-SA 3.0 [Electronic resource]. / Режим доступу : <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12453670> (16.01.2023).
3. Effect of Nanoparticle Incorporation and Surface Coating on Mechanical Properties of Bone Scaffolds: A Brief Review [Text] / Jesus Corona-Gomez, Xiongbiao Chen, Qiaoqin Yang // J. Funct. Biomater. – 2016. – Vol. 7. – P. 18. – doi:10.3390/jfb7030018
4. Донцова, Т. А. Металоксидні наноматеріали та нанокompозити екологічного призначення [Електронний ресурс] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.01 – технологія неорганічних речовин / Донцова Тетяна Анатоліївна. – Київ, 2021. – 391 с. – Режим доступу : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/40516?mode=full>

5. Донцова, Т. А. Металоксидні наноматеріали і нанокомпозити екологічного призначення [Текст] : монографія / Т. А. Донцова. – Київ : «Політехніка», 2021. – 323 с.

6. Mazharul Islam Kiron. Classification, Properties and Applications of Polymer Nanocomposites [Electronic resource]. – Retrieved by : <https://textilelearner.net/nanocomposites-classification-properties> (22.01.2023).

7. Metal Oxide Nanoparticles Market Size, Status Report 2020 by Manufacturers, Type and Application, Forecast to 2026. [Electronic resource]. – Retrieved by : <https://www.wfmj.com/story/42359962/metal-oxide-nanoparticlesmarket-size-status-report-2020-by-manufacturers-type-and-applicationforecast-to-2026> (17.07.2022).

8. Композиційні матеріали в авіабудуванні (огляд). II Технології отримання та обробки конструкційних матеріалів [Електронний ресурс] / С. Б. Беліков, І. П. Волчок, О. А. Мітяєв, В. М. Плєскач, В. О. Савченко – 2017. – С. 32–40. – Режим доступу : <https://cyberleninka.ru/article/n/kompozitsiyeni-materiali-v-aviabuduvanni-oglyad/viewer>

9. Mazharul Islam Kiron. Classification, Properties and Applications of Polymer Nanocomposites. [Електронний ресурс] / – 2021. – С. 32-40. – Режим доступу : <https://textilelearner.net/nanocomposites-classification-properties>

10. Coleman, J. N. Small but strong. A review of the mechanical properties of carbon nanotube-polymer composites [Text] / J. N. Coleman, U. Khan, W. J. Blau, Y. K. Gun'ko // Carbon. – 2006. – Vol. 44, N 9. – P. 1624–1652.

11. Аналіз трибологічних наноматеріалів для підвищення зносостійкості і довговічності механічних контактуючих поверхонь деталей машин і механізмів на основі онтологічної системи підтримки прийняття рішень / В. Т. Сікульський, К. В. Майорова, Ю. А. Воробйов, О. М. Застєла, В. В. Агарков // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології : зб. наук. пр. Нац. аерокосм. ун-та ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». – Х., 2022. – Вып. 96. – С. 97–117.

12. Фесенко, О. М. Проблеми та перспективи розвитку нанотехнологій в Україні та світі [Текст] / О. М. Фесенко, С. В. Ковальчук, Р. А. Нищик // Маркетинг і менеджмент інновацій. – 2017. – №1. – С. 170–179.

13. Baranov O., Košiček M., Filipič G., Cvelbar U. A deterministic approach to the thermal synthesis and growth of 1D metal oxide nanostructures [Text] / O. Baranov, M. Košiček, G. Filipič, U. Cvelbar // Applied Surface Science. – 2021. – No 566. – P. 150619-1-19. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150619>

14. Alancherry S., Jacob M. V., Prasad K. & etc. Tuning and fine morphology control of natural resource-derived vertical graphene [Text] / S. Alancherry, M.V. Jacob, K. Prasad & etc. – Carbon. – 2020. – Is. 159. – P. 668-685. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.10.060>

15. Научные принципы конструирования режущего инструмента с нанопокровками и наноструктурами [Текст] / Г. И. Костюк, В. В. Попов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, Нац. аерокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского "Харьк. авиац. ин-т". – Харьков, 2019. – Вып. 83. – С. 81-97.

16. Механическая обработка труднообрабатываемых сплавов режущими инструментами с наноструктурами [Текст] / Г. И. Костюк, В. В. Попов, М. С. Романов, Г. Д. Торосян [и др.] // Открытые информационные и

компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского "Харьк. авиац. ин-т". – Харьков, 2019. – Вып. 85. – С. 96-110.

17. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы : [монография] / Г. И. Костюк; Междунар. акад. наук и инновац. технологий. - Киев. - Изд-во Междунар. акад. наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с. – 978-966-662-180-4.

18. Canales H., Zolfaguari M. R., Markovych S., Dolmatov A. Effect of stagnation temperature on mechanical properties of Cu+Al₂O₃+Zn coatings produced by low pressure cold spray process [Text] / H. Canales, M. R. Zolfaguari, S. Markovych, A. Dolmatov // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского "Харьк. авиац. ин-т". – Х., 2014. – Вып. 3(79). – С. 57-62.

19. Safarifard, V. Applications of ultrasound to the synthesis of nanoscale metal-organic coordination polymers [Text] / V. Safarifard, A. Morsali // Coordination Chemistry Reviews. – 2015. – Vol. 292. – P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2015.02.014>

20. Mirzaeia, A. Microwave-assisted synthesis of metal oxide nanostructures for gas sensing application: A review [Text] / A. Mirzaeia, G. Neri // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2016. – Vol. 237. – P. 749–775.

21. Silva, G. Preparation and characterization of hydrous zirconium oxide formed by homogeneous [Text] / G. Silva, M. Silva, M. Caetano // Materials Research. – 2002. – Vol. 5(2). – P. 149–153.

22. Dixit, M. Homogeneous precipitation from solution by urea hydrolysis: a novel chemical route to the α -hydroxides of nickel and cobalt [Text] / M. Dixit, G. Subbanna, P. Kamath // Journal of Materials Chemistry. – 1996. – Vol. 6 (8). – P. 1429–1432.

23. Гребеніков О. Г., Бичков С. А. Вплив фретинг-корозії на втомну довговічність конструктивних елементів зі сплаву ВТ6. Фізико-хімічна механіка матеріалів. – Л.: фізико-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України. – 2009. – Т. 45, с. 91–99.

24. Исследование долговечности срезных болтовых стыков при использовании полимерного заполнителя ЗП-2 / С. А. Вигдорчик, Л. Д. Арсон, А. Г. Гребеников, В. Ф. Воронов. Вопросы оптимизации тонкостенных силовых конструкций. – Х.: ХАИ. – 1975. – Вып. 1.

25. Гребеников А. Г., Мяслица А. К., Змиевской И. П. Экспериментальное исследование влияния полимерных заполнителей, герметиков и барьерного обжата на усталостную долговечность гладких полос в условиях фреттинг-коррозии. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2011. – Вып. 50.

26. Waqas Ahmed, Sagheer Gul, Muhammad Awais, Zia Ul Hassan, Saira Jabeen, Muhammad Farooq. A review: novel nanohybrids of epoxy/polyamide with carbon nanotube/nano-diamond [Text] / Ahmed Waqas, Gul Sagheer, Awais Muhammad, Hassan Zia Ul, Jabeen Saira, Farooq Muhammad // Polymer-Plastics Technology and Materials. – 2021. – No 60:6. – P. 579–600.

27. Shadi Houshyar. Polyamide-nanodiamond filament [Text] / Houshyar Shadi, Kumar G. Sathish, Padhye Rajiv, A. Shanks Robert, Amitava Bhattacharyya // *Materials Letters*. – 2021. – Vol. 285, 128992. doi: 10.1016/j.matlet.2020.128992.
28. Zhang, Y. Thermal conductivity and thermo-physical properties of nanodiamond-attached exfoliated hexagonal boron nitride/epoxy nanocomposites for microelectronics [Text] / Zhang, Y.; Choi, J.-R.; Park, S.-J. // *Comp. Part A App. Sci. Manuf.* – 2017. – Vol. 101. – P. 227–236.
29. Nanodiamonds as a state-of-the-art material for enhancing the gamma radiation resistance properties of polymeric membranes [Text] / A. Bedar, N. Goswami, A. K. Singha, V. Kumar, A. K. Debnath et. al. // *Nan. Adv.* – 2020. – Vol. 2. – P. 1214–1227.
30. Mochalin, V. N. The properties and applications of nanodiamonds [Text] / V. N. Mochalin // *Nat. Nanotech.* – 2012. – Vol. 7. – P. 11.
31. Huang, P. Ultra-low friction of a-C: H films enabled by lubrication of nanodiamond and graphene in ambient air [Text] / P. Huang, W. Qi, X. Yin, J. Choi, X. Chen, J. Tian, J. Xu, H. Wu, J. Luo // *Carbon*. – 2019. – Vol. 154. – P. 203–210.
32. Li, J. Evaluation of tribological properties of carbon fiber-reinforced PA6 composites [Text] / J. Li, Y. C. Xia // *Polym. Compos.* – 2010. – Vol. 31. – P. 536-542. <https://doi.org/10.1002/pc.20836>
33. Improvement in the tribological properties of polyamide 6: Talc, glass fiber, graphite, and ultrahigh-molecular-weight polyethylene [Text] / Y. Yi-Lan, L. Du-Xin, S. Gao-Jie et al. // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. – 2016. – Vol. 29. – Is. 4. – P. 494-507. <https://doi.org/10.1177/0892705713519120>
34. Enhanced thermal and mechanical properties by cost-effective carboxylated nanodiamonds in poly (vinyl alcohol) [Text] / Z. Yuansai, H. Qingsong, M. Z. Jian et al // *Nanocomposites*. – 2018. – Vol. 4. – N 2. – P. 58–67. <https://doi.org/10.1080/20550324.2018.1493971>.
35. Mechanical properties of nanodiamond-reinforced polymer-matrix composites [Text] / Urmimala Maitra, K. Eswar Prasad, U. Ramamurty, C.N.R. Rao // *Solid State Communications*. – 2009. – 149 (39-40). – P. 1693–1697.
36. Kausar, A. Nanodiamond reinforcement in polyamide and polyimide matrices: Fundamentals and applications [Text] / A. Kausar // *Journal of Plastic Film & Sheeting*. – 2018. – Vol. 34. – Is. 4. – P. 439–458.
37. Study on Structure, Thermal Behavior, and Viscoelastic Properties of Nanodiamond-Reinforced Poly (vinyl alcohol) Nanocomposites / T. Remiš, P. Bělský, T. Kovářík, et al // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13. – P. 1426. <https://doi.org/10.3390/polym130914>.
38. Structural, electrical, and thermal features of polyimide composites filled with semiconductive MXene sheets [Text] / Qi-Kun Feng, Jia-Yao Pei, Qi Dong, Shao-Long Zhong, Wei-Wei Lu et al // *Applied Physics Letters*. – 2021. – Vol. 118. Is. 26. – P. 262901.
39. Kausar, A. Essence of nanoparticles and functional nanofillers for conducting polymers [Text] / A. Kausar // *Conducting Polymer-Based Nanocomposites*. – 2021. – P. 57–76.
40. Kausar, A. A review of high performance polymer nanocomposites for packaging applications in electronics and food industries [Text] / A. Kausar // *Journal*

of Plastic Film & Sheeting. – 2020. – Vol. 36. – Is. 1. – P. 94–112. Online publication date: 19-May-2019.

41. Water governs the mechanical properties of poly (vinyl alcohol) [Text] / L. Li, X. Xu, L. Liu, P. Song et al. // Polymer. – 2021. – Vol. 213. – P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.123330>.

42. Mechanical properties of nanodiamond-reinforced hydroxyapatite composite coatings deposited by suspension plasma spraying [Text] / C. Xiuyong, Z. Botao, G. Yongfeng, Z. Ping, L. Hua // Applied Surface Science. – 2018. – Vol. 439. – P. 60–65. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.014>.

43. Titanium/nanodiamond nanocomposites: Effect of nanodiamond on microstructure and mechanical properties of titanium [Text] / Z. Faming, L. Suli, Z. Peipei, L. Tengfei, S. Jing // Materials & Design. – 2017. – Vol. 131. – P. 144–155. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.06.015>.

44. Effect of Nanodiamond Concentration and the Current Density of the Electrolyte on the Texture and Mechanical Properties of Ni/Nanodiamond Composite Coatings Produced by Electrodeposition [Text] / L. Meihua, L. Hongnan, W. Dongai et al. // Materials. – 2019. – Vol. 12(7). – P. 1105. doi:10.3390/ma12071105.

45. Abdoli, M. Preparation and characterization of Ni–P/nanodiamond coatings: Effects of surfactants [Text] / M. Abdoli, A. S. Rouhaghdam // Diam. Relat. Mater. – 2013. – Vol. 31. – P. 30–37.

46. Huang, W. Preparing a high-particle-content Ni/diamond composite coating with strong abrasive ability [Text] / W. Huang, Y. W. Zhao, X. L. Wang // Surf. Coat. Technol. – 2013. – Vol. 235. – P. 489–494.

47. Optimization of technology for electrodeposition of nickel coating on Q235A steel substrate [Text] / Y. Zhao, M. Liu, L. Feng, Y. Meng et al. // Mater. Prot. – 2014. – Vol. 9. – P. 32–35.

48. Electrochemical properties of nanodiamond powder electrodes [Text] / J. B. Zang, Y. H. Wang, S. Z. Zhao et al. // Diam. Relat. Mater. – 2007. – Vol. 16. – P. 16–20. doi:10.1016/j.diamond.2006.03.010.

49. Karami, P. Improvement of dry sliding tribological properties of polyamide 6 using diamond nanoparticles [Text] / P. Karami, A. Shojaei // Tribol. Int. – 2017. – Vol. 115. – P. 370–377.

50. Nanodiamond-polymer composite fibers and coatings [Text] / K. D. Behler, A. Stravato, V. Mochalin et al. // ACS Nano. – 2009. Vol. 3. – P. 363–369. doi:10.1021/nn800445z

51. Tribological and mechanical properties of low content nanodiamond epoxy nanocomposites [Text] / M. R. Ayatollahi, E. Alishahi, S. Doagou-R. et al. // Compos. Part B. – 2012. – Vol. 43. – P. 3425–3430. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.022>.

52. Tribological performance of nano-Al₂O₃ reinforced polyamide 6 composites [Text] / L.-X. Zhao, L.-Y. Zheng, S.-G. Zhao // Mater. Lett. – 2006. – Vol. 60(21-22). – P. 2590–2593. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.01.042>.

53. Improving the Wear-Resistance of BT22 Titanium Alloy by Forming Nano-Cellular Topography via Laser-Thermochemical Processing/ Oleksandr Tisov; Alina Yurchuk; Mykhaylo Pashechko; Iryna Pohreluk; Dariusz Chocyk; Myroslav Kindrachuk. Materials, 2023-05. DOI: 10.3390/ma16113900.

54. Duplex Aging and Gas Nitriding Process as a Method of Surface Modification of Titanium Alloys for Aircraft Applications/ Oleksandr Tisov; Yurii Tsybrii; Alina Yurchuk; Myroslav Kindrachuk; Oleksandr Dukhota. Metals. 2022-01. DOI: 10.3390/met12010100.

References

1. Vvedenie v nanotekhnologiyu [Elektronnij resurs] / Rezhim dostupu : http://web.kpi.kharkov.ua/ief/wp-content/uploads/sites/39/2016/07/nano_Termin_presentation1.pdf (12.01.2023).
2. Eric Wieser. CC BY-SA 3.0 [Electronic resource]. / Rezhim dostupu : <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12453670> (16.01.2023).
3. Effect of Nanoparticle Incorporation and Surface Coating on Mechanical Properties of Bone Scaffolds: A Brief Review [Text] / Jesus Corona-Gomez, Xiongbiao Chen, Qiaoqin Yang // J. Funct. Biomater. – 2016. – Vol. 7. – P. 18. – doi:10.3390/jfb7030018
4. Doncova, T. A. Metaloksidni nanomateriali ta nanokompoziti ekologichnogo priznachennya [Elektronnij resurs] : dis. ... d-ra tehn. nauk : 05.17.01 – tekhnologiya neorganichnih rechovin / Doncova Tetyana Anatolijivna. – Kiyiv, 2021. – 391 p. – Rezhim dostupu : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/40516?mode=full>.
5. Doncova, T. A. Metaloksidni nanomateriali i nanokompoziti ekologichnogo priznachennya [Tekst] : monografiya / T. A. Doncova. – Kiyiv : «Politehnika», 2021. – 323 p.
6. Mazharul Islam Kiron. Classification, Properties and Applications of Polymer Nanocomposites [Electronic resource]. – Retrieved by : <https://textilelearner.net/nanocomposites-classification-properties> (22.01.2023).
7. Metal Oxide Nanoparticles Market Size, Status Report 2020 by Manufacturers, Type and Application, Forecast to 2026. [Electronic resource]. – Retrieved by : <https://www.wfmj.com/story/42359962/metal-oxide-nanoparticlesmarket-size-status-report-2020-by-manufacturers-type-and-applicationforecast-to-2026> (17.07.2022).
8. Kompozicijni materialy v aviabuduvanni (oglyad). II Tekhnologiyi otrimannya ta obrobki konstrukciynih materialiv [Elektronnij resurs] / S. B. Byelikov, I. P. Volchok, O. A. Mityayev, V. M. Pleskach, V. O. Savchenko – 2017. – S. 32–40. – Rezhim dostupu : <https://cyberleninka.ru/article/n/kompozitsiyni-materiali-v-aviabuduvanni-oglyad/viewer/>.
9. Mazharul Islam Kiron. Classification, Properties and Applications of Polymer Nanocomposites. [Elektronnij resurs] / – 2021. – S. 32-40. – Rezhim dostupu : <https://textilelearner.net/nanocomposites-classification-properties>.
10. Coleman, J. N. Small but strong. A review of the mechanical properties of carbon nanotube-polymer composites [Text] / J. N. Coleman, U. Khan, W. J. Blau, Y. K. Gun'ko // Carbon. – 2006. – Vol. 44, N 9. – R. 1624–1652.
11. Analiz tribologichnih nanomaterialiv dlya pidvishennya znosostijkosti i dovgovichnosti mehanichnih kontaktuyuchih poverhon detalej mashin i mehanizmiv na osnovi ontologichnoyi sistemi pidtrimki prijnnyattya rishen / V. T. Sikulskij, K. V. Majorova, Yu. A. Vorobjov, O. M. Zastela, V. V. Agarkov // Vidkriti informacijni ta komp'yuterni integrovani tekhnologiyi : zb. nauk. pr. Nac. aerokosm. un-ta im. M.Ye. Zhukovskogo «HAL». – H., 2022. – Vyp. 96. – P. 97–117.

12. Fesenko, O. M. Problemi ta perspektivi rozvitku nanotehnologij v Ukrayini ta sviti [Tekst] / O. M. Fesenko, S. V. Kovalchuk, R. A. Nishik // Marketing i menedzhment innovacij. – 2017. – №1. – P. 170–179.
13. Baranov O., Košiček M., Filipič G., Cvelbar U. A deterministic approach to the thermal synthesis and growth of 1D metal oxide nanostructures [Text] / O. Baranov, M. Košiček, G. Filipič, U. Cvelbar // Applied Surface Science. – 2021. – No 566. – P. 150619-1-19. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150619>
14. Alancherry S., Jacob M. V., Prasad K. & etc. Tuning and fine morphology control of natural resource-derived vertical graphene [Text] / S. Alancherry, M.V. Jacob, K. Prasad & etc. – Carbon. – 2020. – Is. 159. – P. 668-685. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.10.060>
15. Научные принципы конструирования режущего инструмента с нанопокртиями и наноструктурами [Текст] / Г. И. Костюк, В. В. Попов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского "Харьк. авиац. ин-т". – Харьков, 2019. – Вып. 83. – С. 81–97.
16. Механическая обработка труднообрабатываемых сплавов режущими инструментами с наноструктурами [Текст] / Г. И. Костюк, В. В. Попов, М. С. Романов, Г. Д. Торосян [и др.] // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского "Харьк. авиац. ин-т". – Харьков, 2019. – Вып. 85. – С. 96–110.
17. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы : [монография] / Г. И. Костюк; Междунар. акад. наук и инновац. технологий. - Киев. – Изд-во Междунар. акад. наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с. – 978-966-662-180-4.
18. Canales H., Zolfaguari M. R., Markowych S., Dolmatov A. Effect of stagnation temperature on mechanical properties of Cu+Al₂O₃+Zn coatings produced by low pressure cold spray process [Text] / H. Canales, M. R. Zolfaguari, S. Markowych, A. Dolmatov // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского "Харьк. авиац. ин-т". – Х., 2014. – Вып. 3(79). – С. 57–62.
19. Safarifard, V. Applications of ultrasound to the synthesis of nanoscale metal-organic coordination polymers [Text] / V. Safarifard, A. Morsali // Coordination Chemistry Reviews. – 2015. – Vol. 292. – P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2015.02.014>.
20. Mirzaeia, A. Microwave-assisted synthesis of metal oxide nanostructures for gas sensing application: A review [Text] / A. Mirzaeia, G. Neri // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2016. – Vol. 237. – P. 749–775.
21. Silva, G. Preparation and characterization of hydrous zirconium oxide formed by homogeneous [Text] / G. Silva, M. Silva, M. Caetano // Materials Research. – 2002. – Vol. 5(2). – P. 149–153.
22. Dixit, M. Homogeneous precipitation from solution by urea hydrolysis: a novel chemical route to the a-hydroxides of nickel and cobalt [Text] / M. Dixit, G. Subbanna, P. Kamath // Journal of Materials Chemistry. – 1996. – Vol. 6 (8). – P. 1429–1432.

23. Grebenikov O. H., Bychkov S. A. Vplyv fretynh-koroziyi na vtomnu dovhovichnist' konstruktyvnykh elementiv zi splavu VT6. Fizyko-khimichna mekhanika materialiv. – L.: fiziko-mekh.in-t im. H. V. Karpenka NAN Ukrainy. – 2009. – T. 45, p. 91–99.

24. Issledovaniye dolgovechnosti sreznykh boltovykh stykov pri ispol'zovanii polimernogo zapolnitelya ZP-2 / S. A. Vigdorichik, L. D. Arson, A. G. Grebenikov, V. F. Voronov. Voprosy optimizatsii tonkostennykh silovykh konstruktsiy. – KH.: KHAL. – 1975. – Vyp. 1.

25. Grebenikov A. G., Myalitsa A. K., Zmiyevskoy I. P. Eksperimental'noye issledovaniye vliyaniya polimernykh zapolniteley, germetikov i bar'yernogo obzhatiya na ustalostnuyu dolgovechnost' gladkikh polos v usloviyakh fretting-korrozii. Otkrytye informatsionnyye i komp'yuternyye integrirovannyye tekhnologii. – Khar'kov: NAKU «KHAL», 2011. – Vyp. 50.

26. Waqas Ahmed, Sagheer Gul, Muhammad Awais, Zia Ul Hassan, Saira Jabeen, Muhammad Farooq. A review: novel nanohybrids of epoxy/polyamide with carbon nanotube/nano-diamond [Text] / Ahmed Waqas, Gul Sagheer, Awais Muhammad, Hassan Zia Ul, Jabeen Saira, Farooq Muhammad // Polymer-Plastics Technology and Materials. – 2021. – No 60:6. – P. 579–600.

27. Shadi Houshyar. Polyamide-nanodiamond filament [Text] / Houshyar Shadi, Kumar G. Sathish, Padhye Rajiv, A. Shanks Robert, Amitava Bhattacharyya // Materials Letters. – 2021. – Vol. 285, 128992. doi: 10.1016/j.matlet.2020.128992.

28. Zhang, Y. Thermal conductivity and thermo-physical properties of nanodiamond-attached exfoliated hexagonal boron nitride/epoxy nanocomposites for microelectronics [Text] / Zhang, Y.; Choi, J.-R.; Park, S.-J. // Comp. Part A App. Sci. Manuf. – 2017. – Vol. 101. – P. 227–236.

29. Nanodiamonds as a state-of-the-art material for enhancing the gamma radiation resistance properties of polymeric membranes [Text] / A. Bedar, N. Goswami, A. K. Singha, V. Kumar, A. K. Debnath et. al. // Nan. Adv. – 2020. – Vol. 2. – P. 1214–1227.

30. Mochalin, V. N. The properties and applications of nanodiamonds [Text] / V. N. Mochalin // Nat. Nanotech. – 2012. – Vol. 7. – P. 11.

31. Huang, P. Ultra-low friction of a-C: H films enabled by lubrication of nanodiamond and graphene in ambient air [Text] / P. Huang, W. Qi, X. Yin, J. Choi, X. Chen, J. Tian, J. Xu, H. Wu, J. Luo // Carbon. – 2019. – Vol. 154. – P. 203–210.

32. Li, J. Evaluation of tribological properties of carbon fiber-reinforced PA6 composites [Text] / J. Li, Y. C. Xia // Polym. Compos. – 2010. – Vol. 31. – P. 536–542. <https://doi.org/10.1002/pc.20836>.

33. Improvement in the tribological properties of polyamide 6: Talc, glass fiber, graphite, and ultrahigh-molecular-weight polyethylene [Text] / Y. Yi-Lan, L. Du-Xin, S. Gao-Jie et al. // Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 2016. – Vol. 29. – Is. 4. – P. 494–507. <https://doi.org/10.1177/0892705713519120>.

34. Enhanced thermal and mechanical properties by cost-effective carboxylated nanodiamonds in poly (vinyl alcohol) [Text] / Z. Yuansai, H. Qingsong, M. Z. Jian et al // Nanocomposites. – 2018. – Vol. 4. – N2. – P. 58–67. <https://doi.org/10.1080/20550324.2018.1493971>.

35. Mechanical properties of nanodiamond-reinforced polymer-matrix composites [Text] / Urmimala Maitra, K. Eswar Prasad, U. Ramamurty, C.N.R. Rao // *Solid State Communications*. – 2009. – 149 (39-40). – P. 1693–1697.

36. Kausar, A. Nanodiamond reinforcement in polyamide and polyimide matrices: Fundamentals and applications [Text] / A. Kausar // *Journal of Plastic Film & Sheeting*. – 2018. – Vol. 34. – Iss. 4. – P. 439–458.

37. Study on Structure, Thermal Behavior, and Viscoelastic Properties of Nanodiamond-Reinforced Poly (vinyl alcohol) Nanocomposites / T. Remis, P. Bělský, T. Kovařík, et al // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13. – P. 1426. <https://doi.org/10.3390/polym130914>.

38. Structural, electrical, and thermal features of polyimide composites filled with semiconductive MXene sheets [Text] / Qi-Kun Feng, Jia-Yao Pei, Qi Dong, Shao-Long Zhong, Wei-Wei Lu et al // *Applied Physics Letters*. – 2021. – Vol. 118. Iss. 26. – P. 262901.

39. Kausar, A. Essence of nanoparticles and functional nanofillers for conducting polymers [Text] / A. Kausar // *Conducting Polymer-Based Nanocomposites*. – 2021. – P. 57–76.

40. Kausar, A. A review of high performance polymer nanocomposites for packaging applications in electronics and food industries [Text] / A. Kausar // *Journal of Plastic Film & Sheeting*. – 2020. – Vol. 36. – Iss. 1. – P. 94–112. Online publication date: 19-May-2019.

41. Water governs the mechanical properties of poly (vinyl alcohol) [Text] / L. Li, X. Xu, L. Liu, P. Song et al. // *Polymer*. – 2021. – Vol. 213. – P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.123330>.

42. Mechanical properties of nanodiamond-reinforced hydroxyapatite composite coatings deposited by suspension plasma spraying [Text] / C. Xiuyong, Z. Botao, G. Yongfeng, Z. Ping, L. Hua // *Applied Surface Science*. – 2018. – Vol. 439. – P. 60–65. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.014>.

43. Titanium/nanodiamond nanocomposites: Effect of nanodiamond on microstructure and mechanical properties of titanium [Text] / Z. Faming, L. Suli, Z. Peipei, L. Tengfei, S. Jing // *Materials & Design*. – 2017. – Vol. 131. – P. 144–155. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.06.015>.

44. Effect of Nanodiamond Concentration and the Current Density of the Electrolyte on the Texture and Mechanical Properties of Ni/Nanodiamond Composite Coatings Produced by Electrodeposition [Text] / L. Meihua, L. Hongnan, W. Dongai et al. // *Materials*. – 2019. – Vol. 12(7). – P. 1105. doi:10.3390/ma12071105.

45. Abdoli, M. Preparation and characterization of Ni–P/nanodiamond coatings: Effects of surfactants [Text] / M. Abdoli, A. S. Rouhaghdam // *Diam. Relat. Mater.* – 2013. – Vol. 31. – P. 30–37.

46. Huang, W. Preparing a high-particle-content Ni/diamond composite coating with strong abrasive ability [Text] / W. Huang, Y. W. Zhao, X. L. Wang // *Surf. Coat. Technol.* – 2013. – Vol. 235. – P. 489–494.

47. Optimization of technology for electrodeposition of nickel coating on Q235A steel substrate [Text] / Y. Zhao, M. Liu, L. Feng, Y. Meng et al. // *Mater. Prot.* – 2014. – Vol. 9. – P. 32–35.

48. Electrochemical properties of nanodiamond powder electrodes [Text] / J. B. Zang, Y. H. Wang, S. Z. Zhao et al. // *Diam. Relat. Mater.* – 2007. – Vol. 16. – P. 16–20. doi:10.1016/j.diamond.2006.03.010.

49. Karami, P. Improvement of dry sliding tribological properties of polyamide 6 using diamond nanoparticles [Text] / P. Karami, A. Shojaei // *Tribol. Int.* – 2017. – Vol. 115. – P. 370–377.

50. Nanodiamond-polymer composite fibers and coatings [Text] / K. D. Behler, A. Stravato, V. Mochalin et al. // *ACS Nano.* – 2009. Vol. 3. – P. 363–369. doi:10.1021/nn800445z

51. Tribological and mechanical properties of low content nanodiamond epoxy nanocomposites [Text] / M. R. Ayatollahi, E. Alishahi, S. Doagou-R. et al. // *Compos. Part B.* – 2012. – Vol. 43. – P. 3425–3430. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.022>.

52. Tribological performance of nano-Al₂O₃ reinforced polyamide 6 composites [Text] / L.-X. Zhao, L.-Y. Zheng, S.-G. Zhao // *Mater. Lett.* – 2006. – Vol. 60(21-22). – P. 2590–2593. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.01.042>.

53. Improving the Wear-Resistance of BT22 Titanium Alloy by Forming Nano-Cellular Topography via Laser-Thermochemical Processing/ Oleksandr Tisov; Alina Yurchuk; Mykhaylo Pashechko; Iryna Pohreluk; Dariusz Chocyk; Myroslav Kindrachuk. *Materials*, 2023-05. DOI: 10.3390/ma16113900.

54. Duplex Aging and Gas Nitriding Process as a Method of Surface Modification of Titanium Alloys for Aircraft Applications/ Oleksandr Tisov; Yurii Tsybrii; Alina Yurchuk; Myroslav Kindrachuk; Oleksandr Dukhota. *Metals*.2022-01. DOI: 10.3390/met12010100.

Надійшла до редакції 14.04.2023, розглянута на редколегії 14.04.2023

Review of the mechanical properties of nanocomposites for their use in sliding pairs of aircraft mechanisms

The object of the review is polymer nanocomposites (PNC), which are used to increase the wear resistance and durability of mechanical contacting surfaces of parts of machines and mechanisms. The goal is to analyze the production and mechanical properties of PNC when they are used in aircraft and helicopter structural units operating in sliding pairs with a large resource. The analysis of existing research and publications on the use of PNC showed that the use of nanocomposites with a plastic base can be recommended for the manufacture of tribological pairs of aircraft parts. It was established that most authors among the considered nanoadditives give preference to nanodiamonds with a concentration in the range of 1...3%, which, in comparison with all other nanomaterials, give a consistently positive result and also have good environmental indicators.

It was found that for parts of friction pairs it is possible to provide a friction coefficient of about 0.1 due to the use of composite polymers with ND. The following results were obtained. The performed review will allow to create a regulatory base of nanomaterials, necessary for solving structural and technological solutions in sliding pairs of aviation equipment. According to the analysis of the existing current and actual PNC and their preparation, it was established that a friction coefficient of 0.12

can be ensured for the titanium nanocomposite Ti/ND with a content of 0.35% of ND. It is shown that the galvanic application of nanocoatings on steel with a concentration of nanodiamonds in the solution of 8.0 g/l and a current density of 3.0 A/dm² can provide the hardness of the composite coating with a maximum value of 5.302 GPa and an average grain size of 4 nm. The scientific novelty of the obtained results is as follows: the production technologies and main mechanical properties of PNC when used in sliding pairs of aircraft parts are analyzed. It was found that the existing publications do not provide enough information about the important parameters of the obtained materials, such as heat resistance, moisture resistance, environmental friendliness, and others. Conclusions. It is recommended to test ND with a concentration in the range of 1...3% on tribological parts of aircraft, as well as in sliding pairs with a long life. However, despite the unique mechanical properties of nanocomposites, the regulatory framework for the design of sliding pairs requires additional research and experiments. The given materials can be useful in carrying out theoretical and experimental studies on extending the resource, operation and repair of aircraft and helicopter parts.

Keywords: polymer nanocomposites; nanomaterial; nanodiamond; tribological pairs; aviation production.

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: k.maiorova@khai.edu, тел. 095.050.8155, Scopus 57204427689, ORCID 0000-0003-3949-0791.

Горлов Олександр Кузьмич – 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: o.gorlov@khai.edu, тел. 050.289.6533.

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.

Малашенко Володимир Львович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології виробництва літальних апаратів, Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: v.malashenko@khai.edu, тел. 067.951.2340.

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.

Maiorova Kateryna – PhD, Associate Professor, Head of the Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: k.maiorova@khai.edu, Tel. 095.050.8155, Scopus 57204427689, ORCID 0000-0003-3949-0791.

Gorlov Oleksandr – Doctor of Technical Science, Associate Professor, Professor at the Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.gorlov@khai.edu, Tel. 050.289.6533.

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.

Malashenko Volodymyr – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: v.malashenko@khai.edu, Tel. 067.951.2340, Scopus, ORCID.

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.