

*М. М. ТКАЧУК, Н. В. ПІНЧУК, А. О. МЕЙЛЕХОВ, В. А. РЯБОШТАН, М. А. ТКАЧУК,  
А. В. ГРАБОВСЬКИЙ, В. І. СЕРИКОВ*

## ТЕОРІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МЕТОДИ ІНЖЕНЕРНОГО АНАЛІЗУ ВИСОКОМІЦІСНИХ НАНОСТРУКТУРОВАНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ СЛУЖБОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄКТІВ ВІЙСЬКОВОЇ ТА ЦИВІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Сучасні об'єкти військової та цивільної техніки потребують підвищення службових властивостей найбільш відповідальних та навантажених контактуючих елементів, що визначають їх тактико-технічні і технічні характеристики. Натепер традиційні та нові матеріали у багатьох аспектах вичерпали такі можливості. Ці можливості можна різко підвищити за рахунок зміцнення, зокрема, напиленням наноструктурних високоміцних та багатошарових нітридних покриттів на основі нітридів титану, цирконію тощо, а також модифікованих вакуумних конденсатів. Разом із тим для елементів конструкцій із контактуючими поверхнями близької форми важливо обирати структуру, склад та режими нанесення цих покриттів та псевдосплавів тільки паралельно із аналізом їх контактної взаємодії як одного із визначальних чинників. Задля цього у роботі буде розроблено нові варіаційні постановки задач, здійснено дослідження та розроблені рекомендації стосовно підвищення службових властивостей контактуючих елементів об'єкти військової та цивільної техніки формуванням наноструктурних високоміцних та багатошарових нітридних покриттів та псевдосплавів. Саме поєднання нових авторських підходів у контактній механіці та у фізиці наноструктурних металів дає основу для проривних технічних рішень об'єкти військової та цивільної техніки із підвищеними тактико-технічними і технічними характеристиками: танків, бронемашин, роботизованих бойових платформ, турбомашин.

**Ключові слова:** об'єкти військової та цивільної техніки; високоміцне та багатошарове нітридне покриття; модифікований вакуумний конденсат; технічна характеристика

*М. М. ТКАЧУК, Н. ПИНЧУК, А. МЕЙЛЕХОВ, В. РИАБОШТАН, М. А. ТКАЧУК,  
А. ГРАБОВСКИЙ, В. СИЕРКОВ*

## THEORY OF TECHNOLOGY AND METHODS OF ENGINEERING ANALYSIS OF HIGH-STRENGTH NANOSTRUCTURED COATINGS FOR ENHANCED SERVICE CHARACTERISTICS OF MILITARY AND CIVIL EQUIPMENT OBJECTS

Modern military and civil equipment objects need to improve the service properties of the most critical and loaded contacting elements, which determine their tactical and technical characteristics. So far, traditional and new materials have exhausted such possibilities in many aspects. These capabilities can be dramatically increased by means of strengthening, in particular, application of nanostructured high-strength and multilayer nitride coatings based on titanium nitrides, zirconium, etc., as well as modified vacuum condensates. At the same time, for structural elements with closeshaped contacting surfaces, it is important to choose the structure, composition and methods of application of these high-strength and multilayer nitride coatings and pseudoalloys only in parallel with the analysis of their contact interaction. For this purpose, the paper develops new variational statements of contact problems, perform analysis and develop recommendations on improving the service properties of contacting elements of military and civil equipment objects by forming high-strength and multilayer nitride coatings and pseudoalloys. It is the combination of new author's approaches in contact mechanics and in the physics of nanostructured metals, on the other hand, that provides the basis for breakthrough technical solutions of modern military and civil equipment objects with increased their tactical and technical characteristics: battle tanks, armored vehicles, robotic combat platforms, turbomachines.

**Keywords:** military and civil equipment objects; high-strength and multilayer nitride coating; modified vacuum condensate; technical characteristic

**Вступ.** Задача, що вирішується у руслі науково-прикладних проблем, які постали перед наукою і технікою на сучасному етапі, полягає у необхідності обґрунтування проривних технічних рішень задля підвищення службових характеристик контактуючих елементів об'єктів військової та цивільної техніки (ОВЦТ) шляхом формування високоміцних покриттів та псевдосплавів на основі нітридів титану, цирконію, міді, танталу тощо. Важливою обставиною є те, що властивості цих покриттів суттєво залежать від використовуваних матеріалів, кількості та товщин шарів у композиції. При цьому вибір технологічних режимів нанесення покриття слід здійснювати із урахуванням різкої зміни умов контактної взаємодії зміцнених таким чином елементів конструкцій. Виникає прикладна проблема розроблення нових варіаційних постановок і здійснення на цій основі досліджень контактної взаємодії та розроблення рекомендацій стосовно конструктивно-технологічних рішень елементів ОВЦТ із високоміцними покриттями та псевдосплавами із підвищенням їх характеристик до світового рівня. Це сформуло напрямки розробок, описаних у цій роботі

**Аналіз методів дослідження контактної взаємодії зміцнених елементів конструкцій.** Сучасна механіка суцільного середовища та фізичне матеріалознавство на теперішньому етапі досягли значного розвитку як у фундаментальних, так і у прикладних аспектах [1–10]. Зокрема, контактна механіка [1–6] має у своєму розпорядженні як традиційні [1], так і сучасні методи досліджень [2–6]. Крім того, розвинено нові моделі властивостей поверхневих шарів матеріалів [4, 5]. Перші [1–3, 6] оперують із макropостановками задач контактної взаємодії. Другі [4, 5] – із мікромасштабними моделями. Якраз поєднання мікро- та макромасштабних моделей складає першу суттєву проблему, яка дотепер не отримала свого повного вирішення. На противагу, автори якраз у цьому аспекті здійснили низку проривних розробок та досліджень, що можуть стати основою досліджень на інтегрованих мікро-макромоделях. Що стосується сучасних методів зміцнення елементів конструкцій, то матеріалознавство як одну із прогресивних груп

© М. М. Ткачук, Н. В. Пінчук, А. О. Мейлехов,  
В. А. Рябоштан, М. А. Ткачук, А. В. Грабовський,  
В. І. Сериков, 2024

методів пропонує вакуумно-плазмові покриття та електронно-променеве випаровування [7–9]. Такі покриття та псевдосплави здатні різко підвищити міцність, твердість, зносостійкість, корозійну стійкість цих елементів. До них відносяться, зокрема, покриття на основі нітридів різних металів та плівки, отримані вакуумною конденсацією. Для усунення певних недоліків цих покриттів розроблені методи створення наноструктурних високоміцних та багатощарових покриттів та синтезу вакуумних наноструктурних плівок на основі металів (псевдосплавів). Цим вирішується друга суттєва проблема – досягнення унікальних службових властивостей елементів ОВЦТ. Третя проблема має два аспекти. Перший із них – теоретичний. Він супроводжує сумісний аналіз контактної взаємодії та розроблення вакуумних та вакуумно-дугових методів зміцнення, що натеper відсутній [1–9]. Це пояснюється різнорідними моделями та методами досліджень, як свідчить аналіз відповідно робіт [1–9] у співставленні першої [1–6] та другої [7–9] їх груп. У практичному ж аспекті, особливо стосовно об'єктів військового призначення, важливо врешті досягти успішного кінцевого результату на світовому рівні [10]. А вже ця практична необхідність диктує актуальність проблеми інтеграції теоретичних досліджень у механіці контактної взаємодії та фізиці наноструктурних покриттів та псевдосплавів і у предметних областях озброєння та військової, а також стратегічно важливої цивільної техніки. Ці проблемні питання ще не знайшли свого вирішення у наукових публікаціях [1–10], а практика, особливо в аспекті обороноздатності та національної безпеки, диктує їх високу актуальність та значущість.

У аспектах, що висвітлені вище, проступає декілька нових нерозроблених проблем.

Перша стосується моделювання властивостей поверхневих шарів. У цьому напрямку слід визначати мікромоделі, які описані у роботах [11–15] та які дають можливість визначати властивості поверхневих шарів шорсткості. Проте ці моделі незастосовні до визначення властивостей різного типу і інших покриттів [16–20], особливо – наноструктурних [21–23]. Тут якраз важливу роль відіграють властивості матеріалів та режимів їх формування, що проявляються на нанорівні та на теперішньому етапі в основному можуть бути визначені тільки шляхом лабораторних вимірювань.

Так, у роботі [16] досліджено вплив потенціалу зміщення, прикладеного до підкладки під час осадження, і товщини шару на елементний склад, структуру, субструктуру та напружено-деформований стан (TiMo)N/ZrN шарів багатоперіодних покриттів. Результати елементного аналізу свідчать про зменшення відношення (Ti + Mo)/Zr зі збільшенням потенціалу зміщення та зменшенням товщини шару. На структурному рівні виявлено появу додаткових дифракційних піків для (TiMo)N/ZrN покриттів з найтоншими (близько 12 нм) шарами. Поява таких піків пояснюється ефектом перемішування на межі розділу шарів за рахунок імплантації прискорених частинок. Встановлено, що легування Ti атомами Mo в шарах (TiMo)N призводить до великої деформації

стиснення (близько 5 %). У монометалічних шарах ZrN величина макродеформації більш ніж у 2 рази менша. На субструктурному рівні утворення твердого розчину (TiMo)N також призводить до вищої мікродеформації порівняно з аналогічним параметром у монометалічних шарах ZrN. Твердість багатоперіодних (TiMo)N/ZrN композитів досягає високого значення 35 ГПа.

Досліджені фрикційні характеристики покриттів на алюмінієвому сплаві Д16, які сформовані методом мікродугового оксидування (МДО) в лужно-силікатному електроліті при катодно-анодному режимі наведені у [18]. Досліджена структура та морфологія робочого шару поверхні методом мікродугового оксидування МДО–покриття, який працює в парах тертя з чавуном, сталлю та МДО–покриттям в умовах змащування дизельною оливою та водою. Показана користь від наявної пористості робочого шару методом мікродугового оксидування МДО–покриття, яка складає 5–10% та сприяє утриманню мастила в зоні тертя. Вивчено фазовий склад, твердість покриттів та визначено коефіцієнт тертя ковзання на машині тертя СМЦ-2 за схемою «диск–колодка» при використанні в якості мастила води і дизельної оливи; навантаження змінювалось від 0,2 до 2 кН, номінальний тиск від 1 до 11 МПа. Встановлено, що виконане методом мікродугового оксидування МДО–покриття має кристалічну будову, фазовий склад – високотемпературні модифікації окислу алюмінію ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), твердість – 18000 – 20000 МПа. Встановлено, що коефіцієнт тертя ковзання пари «сірий чавун – МДО–покриття», «сталь – МДО–покриття» та «МДО по МДО» знижується до значення 0,01 - 0,013 в умовах мастила. Виявлено, що в парі «МДО–покриття – МДО–покриття» антифрикційні властивості проявляються в умовах змащування як оливою, так і водою. Низький коефіцієнт тертя для пари «покриття – покриття» у випадку змащування водою пояснюється високими гідрофільними властивостями оксидних контактуючих поверхонь, що дозволяє рекомендувати їх до використання у підшипниках ковзання (вкладишах) гідротурбін. Зроблено висновок щодо причин, які обумовлюють низький коефіцієнт тертя досліджуваних зразків.

У роботі [21] досліджено елементний та фазовий склад, структуру, субструктуру та механічні властивості нанокомпозитних покриттів на основі квазібінарної системи карбідів вольфраму та титану. Встановлено, що в результаті селективного напилення при формуванні покриття воно збагачується важкими атомами вольфраму порівняно з напиленою мішенню. Вміст атомів вуглецю змінюється пропорційно зміні вмісту атомів титану в покритті, що визначається більшою енергією зв'язку в системі Ti-C порівняно з W-C. При низькому вмісті атомів титану в «покритті в покритті» формується двофазний стан з (Ti, W)C (з ГЦК кристалічною решіткою (структурний тип NaCl) і W<sub>2</sub>C (з гексагональною щільноупакованою ґраткою) фаз. Характерні області концентрації з певною швидкістю росту кристалітів і утворенням мікродеформованого стану. Встановлено, що в областях з низькими концентраціями домішкових

елементів виявляються максимуми твердості, пов'язані з утворенням двофазного стану та поява переважної орієнтації кристалітів перпендикулярно до площини росту. Твердість нанокompatитних покриттів значно перевищує твердість основних WC та TiC покриттів і відповідає надтвердому стану з максимальним значенням (39,1 ГПа).

У статті [23] ідеться про формування високотемпературних плівок  $\beta$ -фази, отриманих методом магнетронного розпилення. Пояснено принцип утворення плівок  $\beta$ -фази. Показано, що плівки  $\beta$ -фази складаються з елементів, які кристалізуються в різні кристалічні структури і є новим класом гетероструктурних плівок. Властивості плівок  $\beta$ -фази є унікальними, і вони контролюються кристалічними структурами, в яких кристалізуються елементи, що містяться в плівках. Це означає, що існують три основні параметри, які визначають результуючі властивості плівок  $\beta$ -фази: (1) енергія, що надходить у плівку під час її росту, (2) елементний склад плівки та (3) кристалічна структура елементів або фаз у плівки. Існування багатьох можливих комбінацій кристалічної структури елементів і/або фаз у плівці дає можливість розробляти нові прогресивні гетероструктурні плівки з новими унікальними властивостями.

Друга проблема полягає у методологічній основі для моделювання контактної взаємодії тіл із урахуванням властивостей матеріалів проміжних шарів. Тут слід зазначити, що у цих питаннях можна опертися на варіаційні постановки контактних задач [24–28]. Проте пряме їх використання можливе, і потрібно здійснювати розвиток цих варіаційних формулювань стосовно урахування властивостей проміжних шарів матеріалів.

В роботі [28] розглянуто задачу термопружного контакту кількох тіл за умов одностороннього механічного контакту через нелінійні поверхневі шари Вінклера та умови неідеального теплового контакту. Отримано слабку постановку цієї задачі у вигляді системи, утвореної варіаційним рівнянням і варіаційною нерівністю, а також альтернативну слабку постановку у вигляді системи лінійних і нелінійних варіаційних рівнянь. Для розв'язання системи варіаційних рівнянь термомеханічної контактної задачі розроблено паралельні ітераційні алгоритми декомпозиції області типу Робена, на кожному кроці яких необхідно розв'язати два лінійних варіаційних рівняння для кожного тіла, одне з яких відповідає задачі теплопровідності з умовами Ньютона в зонах можливого контакту, а інше відповідає задачі теорії пружності з умовами Робена у цих зонах і додатковими об'ємними силами. Проведено аналіз чисельної ефективності запропонованих алгоритмів для плоскої термомеханічної задачі контакту двох пружних тіл з використанням скінченно-елементних наближень.

Третя проблема полягає у поєднанні наномікроскопічних моделей властивостей матеріалів проміжних шарів, а, з іншого, – макромоделей контактної взаємодії.

І, нарешті, четверта проблема стосується чисельної реалізації побудованих моделей та розроблених методів досліджень.

Зазначені чотири проблемних напрямки

віднайшли часткове вирішення у роботах [29–33], де описані засади нових методів і мікромакромасштабних моделей контактної взаємодії елементів об'єктів військової та цивільної техніки, у т.ч. – за наявності проміжних та поверхневих шарів напиль, покриттів або плівок (вакуумних конденсатів). За об'єктом роботи розроблено основи параметричного моделювання, що уможливорює варіювання об'єктів досліджень. Застосоване дискретне, скінченно- та гранично-елементне моделювання поведінки складних конструкцій окремих ОВЦТ. Створено методологію побудови багаторівневих моделей контактної взаємодії тіл на основі модифікації варіаційних принципів типу Калькера та варіаційних нерівностей [24–33]. Це дає змогу враховувати різні типи нелінійностей. Також розроблено модифікації методів граничних та скінченних елементів стосовно аналізу контактної взаємодії тіл із модифікованими поверхневими шарами [29–33]. Здійснено їх успішну апробацію на дослідних зразках із нових матеріалів і тестових конструкціях із традиційних матеріалів із покриттями із установленими окремими закономірностями. Створено матеріалознавчі основи розробки нових наноструктурних високоміцних та багатошарових покриттів, а також псевдосплавів [16, 17]. Перелічені розробки потребують продовження та розвитку в напрямку адаптації стосовно елементів об'єктів військової та цивільної техніки із урахуванням особливостей форми, властивостей матеріалів, технологій модифікації поверхонь і умов експлуатації та бойового застосування. При цьому окреслені вище два наукових напрямки потребують взаємointegraції, оскільки це диктується практичними потребами нових технологій зміцнення та аналізу контактної взаємодії.

*Мета роботи* – розробити теоретичні основи підвищення службових характеристик контактуючих елементів об'єктів військової та цивільної техніки шляхом формування високоміцних наноструктурних нітридних покриттів задля забезпечення світового рівня їхніх службових властивостей.

Тобто пропонується просуватися шляхом створення теоретичних засад і дослідження контактної взаємодії їхніх елементів, зміцнених вакуумно-дуговими нітридними покриттями та наноструктурними металами, на основі варіаційних постановок, наномікроскопічних моделей та параметричного моделювання, а також розроблення на цій основі рекомендацій із обґрунтування удосконалених технічних рішень.

Досягнення поставленої мети передбачає виконання комплексу теоретичних досліджень, розроблення і удосконалення методів і моделей для аналізу поведінки елементів об'єктів військової та цивільної техніки та розв'язання наступних основних завдань.

1. На основі аналізу та розвитку існуючих методів розробити удосконалені методи формування наноструктурних високоміцних та багатошарових покриттів на основі нітридів титану та цирконію, а також псевдосплавів.

2. Розробити нелінійні математичні моделі поведінки елементів ОВЦТ, які перебувають в умовах контактної взаємодії між собою уздовж

поверхонь, зміцнених вакуумно-дуговими покриттями та вакуумними плівками.

3. Запропонувати нове варіаційне формулювання, яке відображає реакцію елементів об'єктів військової та цивільної техніки, зміцнених нітридними покриттями, при дії навантаження.

**Основні підходи, моделі та методи досліджень контактної взаємодії тіл із наноструктурними покриттями.** Основною особливістю підходу, що пропонується, є його інтеграційний комплексний характер. Це зумовлюється низкою аспектів:

1) у єдиній моделі поєднуються різноманітні підмоделі: з одного боку, – контактної взаємодії складнопрофільних елементів об'єктів військової та цивільної техніки із урахуванням тонких покриттів та плівок, які привносять суттєве збурення у розподіл контактної тиску між ними порівняно із традиційними випадками; з іншого боку, – формування нових наноструктурних високоміцних, багат шарових нітридних покриттів та псевдосплавів;

2) у моделі властивостей матеріалів шарів покриттів урахується зв'язок їх наномікроскопії та макровластивостей, що дає, на відміну від традиційних, більш високий рівень адекватності та обґрунтованості;

3) у загальній параметричній моделі досліджуваного елемента ОВЦТ забезпечується опис їх структур, складу та властивостей, що, на відміну від існуючих моделей, уможливує цілеспрямоване та безконфліктне варіювання об'єкту досліджень задля підвищення технічних і тактико-технічних характеристик ОВЦТ. При цьому, на відміну від традиційних підходів, відбувається синтез не в окремих параметричних підпросторах, а в об'єднаному просторі конструктивних та технологічних чинників. Перелічені компоненти дають можливість здійснювати дослідження міцності елементів ОВЦТ та розробляти рекомендації із обґрунтування їх прогресивних технічних рішень із технічними та тактико-технічними характеристиками (ТТТХ) на світовому рівні.

У ході досліджень розробляються нові методи розв'язання систем нелінійних співвідношень для сумісного моделювання контактної взаємодії та зміцнення шляхом формування наноструктурних нітридних покриттів та модифікованих плівок для зміцнення елементів ОВЦТ, які відрізняються від традиційних урахуванням варіювання властивостей матеріалів в об'ємі та поверхневих шарів покриття, а також форми поверхонь тіл у зоні контактування задля підвищення службових характеристик цих елементів. Ці методи реалізуються у вигляді програмно-модельного комплексу, який є засобом досліджень. Методологія досліджень полягає у поетапному виконанні етапів від формування системи розв'язувальних співвідношень, розроблення чисельних моделей і до здійснення багатоваріантних комп'ютерних розрахунків та експериментів із варіюванням низки параметрів (форма контактуючих поверхонь, залежність властивостей матеріалів покриттів від режимів

формування тощо). У результаті встановлюються закономірності впливу варіюваних параметрів на характеристики міцності елементів об'єктів військової та цивільної техніки, а також рекомендації стосовно обґрунтування їх технічних рішень задля забезпечення ТТТХ об'єктів військової та цивільної техніки на світовому рівні. У цілому для вирішення окресленої проблеми розвинені на єдиних методологічних засадах методи класичної механіки суцільного середовища і контактної взаємодії, наномікромакромоделі властивостей матеріалів та варіаційні формулювання задач аналізу напружено-деформованого стану (НДС).

Відповідно, будується удосконалена теорія контактної взаємодії елементів об'єктів військової і цивільної техніки із урахуванням впливу нових наноструктурних нітридних покриттів та псевдосплавів на основі розвитку теорії варіаційних нерівностей і варіаційного принципу Калькера. Для цього будується удосконалена комплексна модель контактної взаємодії, яка об'єднує, на відміну від традиційних спрощених підходів, різні типи неоднорідностей, що поєднуються та взаємовпливають. Вона більш адекватно описує нелінійну поведінку матеріалів за умов контакту за наявності покриттів, а також псевдосплавів. Це дає змогу удосконалити структуру розв'язувальних співвідношень для аналізу міцності та довговічності елементів ОВЦТ. На цій основі встановлюються закономірності зміни розподілу контактної тиску і напружено-деформованого стану елементів ОВЦТ залежно від геометричної форми деталей і властивостей нових покриттів та наноструктурних плівок. Аналіз та узагальнення отриманих результатів досліджень є основою рекомендацій щодо проектно-технологічних рішень для елементів ОВЦТ, що забезпечують їхню міцність та довговічність і, як наслідок, – підвищені характеристики цих виробів. У підсумку отримуються нові наукові знання, а на їхній основі – теоретичні засади, моделі, методи, засоби і дані прикладних досліджень, які дають змогу встановлювати закономірності та рекомендації стосовно формування службових властивостей елементів ОВЦТ, а також обґрунтовувати їх прогресивні технічні рішення із ТТТХ на світовому рівні.

Створені моделі базуються на строгих математичних постановках механіки суцільного середовища й матеріалознавства. Розв'язувальні співвідношення виводяться та модифікуються із загальних варіаційних принципів, доповнені та розвинені для нового класу задач. Дискретизація цих співвідношень здійснюється із застосуванням чисельних методів для рівнянь математичної фізики та теорії апроксимації, зокрема, на основі розвинених варіантів методів скінчених та граничних елементів. Розв'язання кінцевих систем співвідношень здійснюватиметься на основі розвитку методів додаткових зазорів та змінних податливостей. Сформовані рекомендації у ході подальших досліджень можуть бути впроваджені у нових більш досконалих технічних рішеннях

елементів об'єктів військової та цивільної техніки із ТГТХ на світовому рівні.

Таким чином, окреслені теоретичні основи дослідження НДС, забезпечення міцності та синтезу властивостей поверхневих вакуумно-дугових нітридних покриттів матеріалів і псевдосплавів та форми поверхонь контактуючих елементів ОВЦТ за критеріями міцності та довговічності, а також розв'язання таких задач та отримання нових результатів досліджень:

1. Розроблення нової нелінійної багатофакторної моделі контактної взаємодії, яка, на відміну від традиційної однофакторної, дає змогу досліджувати конструктивні та технологічні чинники сумісно та у взаємовпливі.

2. Розвиток варіаційних принципів на випадок більш загального закону розподілу властивостей матеріалів системи контактуючих тіл, ніж традиційні спрощені залежності.

3. Розвиток методів розв'язання системи нелінійних співвідношень, які, на відміну від традиційних, мають не постійні, а змінювані умови контактної взаємодії у кожній точці області контакту залежно від поточного НДС.

4. Нові закономірності розподілу контактного тиску залежно від впливу форми, властивостей матеріалів і поверхневих шарів нітридних покриттів та вакуумних псевдосплавів, а також зміни компонент напружено-деформованого стану контактуючих тіл та характеристик їх міцності та довговічності.

5. Обґрунтовані на основі досліджень рекомендації щодо обґрунтування форми та властивостей матеріалів елементів ОВЦТ, структури і складу нітридних покриттів та псевдосплавів.

#### Висновки.

1. З точки зору науково-прикладних потреб цінність досліджень складає новий клас важливих об'єктів, що ними охоплені, – контактуючі елементи складних конструкцій із властивостями наноструктурних нітридних покриттів та псевдосплавів, залежними від режимів формування, що важливо для розвитку механіки суцільного середовища та фізичного матеріалознавства.

2. Першочергове значення результати виконання досліджень за пропонованим напрямком мають для механіки, машинознавства, матеріалознавства, озброєння та військової техніки та промисловості (ОПК, енергетичне та транспортне машинобудування тощо).

3. Створені методологічні основи досліджень та розроблене підґрунтя для обґрунтування нових технічних рішень, які забезпечують підвищені військової та цивільної техніки. Якраз у цих напрямках в Україні необхідний суттєвий прогрес із огляду на сучасний соціально-економічний та безпековий стан.

4. На базі отриманих результатів можливе удосконалення технологій зміцнення контактуючих елементів конструкцій.

5. На відміну від робіт [1–6], більш коректно враховуються властивості поверхневих шарів

покриттів, причому будується не традиційна однофакторна, а багатофакторна модель.

6. На відміну від робіт [7–9], в удосконаленій моделі більш коректно враховуються фізичні чинники, що відповідають за формування нітридних покриттів та вакуумних конденсатів.

7. На розвиток відомих [10] методів синтезу технічних рішень пропонуються методи, що формують розв'язок у розширеному об'єднаному просторі конструктивних та технологічних чинників.

Підсумково, можна зробити висновок, що підхід, якій пропонується, та результати подальших досліджень на їх основі мають важливі переваги та здійснюють прорив у механіці, матеріалознавстві, чисельних методах досліджень.

#### Список літератури

- Barber J.R. (2019). *Contact Mechanics*. SpringerInternational Publishing, 585 p.
- Runar L. Berge, et al. (2020). Finite volume discretization for poroelastic media with fractures modeled by contact mechanics. *IJNME*, 121(4), 571–777:10.1002/nme.6238
- Li Q., Pohrt R., Lyashenko I. A., Popov V. L. (2019). Boundary element method for nonadhesive and adhesive contacts of a coated elastic half-space. *Proc. Inst.Mech. Eng. J*, 234, 73–83.
- Violano, G., Papangelo, A., Ciavarella, M. (2021) Stickiness of randomly rough surfaces with high fractal dimension: is there a fractal limit?, *Tribology International*, 159, 106971
- Martynyak, R., Torskaya, E., Xu, Y. (2020). Friction and Multi-Field Problems in Sliding Contacts. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 6, 76
- Li, Q. and Popov, V. L. (2020). Non-adhesive contacts with different surface tension inside and outside the contact area. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 6, 63
- Schalk, N., Tkadletz, M., Mitterer, C. (2022). Hard coatings for cutting applications: Physical vs. chemical vapor deposition and future challenges for the coatings community, *Surface and Coatings Technology*, 429, 27949
- Maksakova, O., Pogrebnyak and others. (2019). Study of advanced nanoscale ZrN/CrN multilayer coatings. *East-European Journal of Physics*, 2, 27–32.
- Kale C., Turnage S., Garg P., Adlakhia I., Srinivasan S., Hornbuckle B.C., Darling K., Solanki K.N. (2019). Thermo-mechanical strengthening mechanisms in a stable nanocrystalline binary alloy – A combined experimental and modeling study. *Materials & Design*, vol. 163, 107551. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107551>
- Чепков, І. Б. (2021). Використання передових наукових знань, технологічних розробок та інновацій для зміцнення обороноздатності держави та досягнення військової переваги у технологічній сфері. *Вісник НАН України*, (6), 59–62.
- Li, Q., Pohrt, R., Lyashenko, I. A., Popov, V. L. (2018). Boundary element method for nonadhesive and adhesive contacts of a coated elastic half-space. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 1350650119854250.
- Ciavarella M. (2015). Adhesive rough contacts near complete contact. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 104, pp. 104–111.
- Pohrt R., Popov V. L. (2013). Contact stiffness of randomly rough surfaces. *Scientific reports*, vol. 3(1): 3293.
- Persson B.N.J. (2001). Elastoplastic contact between randomly rough surfaces. *Physical Review Letters*, vol. 87(11), pp. 116101.
- Li Q., Popov V. L. (2019). Adhesive contact between a rigid body of arbitrary shape and a thin elastic coating. *Acta Mechanica*, vol. 230, iss. 7, pp. 2447–2453.
- Sobol, O. V., Pinchuk, N. V., Meylekhov, A. A., Subbotina, V. V., Dur, O., Stolbovoy, V. A., & Kovteba, D. V. (2020). Structural engineering of multi period (TiMo) N/ZrN vacuum arc coatings. *Functional materials*, 4, 737. <https://doi.org/10.15407/FM27.04.736>
- Postelnyk, H. O., Pinchuk, N. V., Meylekhov, A. A., Zhadko, M. A., Andreev, A. A., & Stolbovoy, V. A. (2021). Influence of Bias

- Potential Magnitude on Structural Engineering of ZrN-Based Vacuum-Arc Coatings. *Physics and Chemistry of Solid State*, 22(1), 66-72. <https://doi.org/10.15330/PCSS.22.1.66-72>
18. Субботін О. В., Білозеров В. В., Волков О. О., Субботіна В. В., Шевцов В. М. Фрикційні властивості МДО-покриттів на алюмінієвих сплавах *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. 2022. № 2. С. 59–63
  19. Subbotina, V., Sobol, O., Belozero, V., Subbotin, A., Smyrnova, Y. (2020). A study of the phase-structural engineering possibilities of coatings on D16 alloy during micro-arc oxidation in electrolytes of different types, *Eastern-european journal of enterprise technologies*, vol. 4, no. 12 (106), pp. 14–23.
  20. Matykina, E., Arrabal, R., Mohedano, M., Mingo, B., Gonzalez, J., Pardo, A. (2017). Recent advances in energy efficient PEO processing of aluminium alloys, *Transactions of nonferrous metals society of China*, vol. 27, pp. 1439–1454.
  21. Sobol, O., Dur, O. (2020). Structural Engineering of Nanocomposite Coatings Based on Tungsten and Titanium Carbides. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Zajac, J., Peraković, D. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7\\_54](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_54)
  22. Bourebia M, Laouar L, Hamadache H, Dominiak S. Improvement of surface finish by ball burnishing: approach by fractal dimension. *Surface Engineering*. 2017;33(4):255-262. doi:10.1080/02670844.2016.1232778
  23. Musil J., Kos Š., Zenkin S., Čiperová Z., Javdošňák D., Čerstvý R. (2018).  $\beta$ - (Me<sub>1</sub>, Me<sub>2</sub>) and Me<sub>N</sub>x films deposited by magnetron sputtering: Novel heterostructural alloy and compound films. *Surface and Coatings Technology*, vol. 337, pp. 75–81. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.12.057>
  24. Trémolières R., Lions J.-L., Glowinski R. *Numerical Analysis of Variational Inequalities*. Amsterdam: Elsevier, 2011. 775 p.
  25. Martynyak R. M., Prokopyshyn I. A., Prokopyshyn I. I. (2015). Contact of elastic bodies with nonlinear Winkler surface layers. *Journal of Mathematical Sciences*, 3, vol. 205, iss. 4, pp. 535–539.
  26. Zhao J., E. Vollebregt, C. (2016). Oosterlee Extending the BEM for elastic contact problems beyond the half-space approach. *Mathematical Modelling and Analysis*, vol. 21 (1), pp. 119–141.
  27. Kinderlehrer D., Stampacchia G. *An Introduction to Variational Inequalities and Their Applications. Classics in Applied Mathematics* (Том 31). SIAM, 2000. 333 p.
  28. Prokopyshyn I. I. (2022). Thermomechanical Contact of Elastic Bodies with Nonlinear Winkler Surface Layers. *Journal of Mathematical Sciences*. 265(21-26). DOI:10.1007/s10958-022-06068-4
  29. Ткачук Н.Н., Львов Г.И., Грабовский А.В., Скрипченко Н.Б. Контактное взаимодействие элементов машин с нелинейно упругим промежуточным слоем. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Харків, НТУ «ХПІ». 2018. № 33 (1309). С. 43–63.
  30. Ткачук М. М. *Контактна механіка тіл із урахуванням нелінійних властивостей поверхневих та проміжних шарів: монографія*. Видання друге. Дніпро: Видавель Обдимко Ольга Станіславівна, 2023. 255 с.
  31. Мартиняк Р.М., Маланчук Н.І., Кузьменко В.І., Михальчук Г.Й., Чумак К.А., Ткачук М.М., Стреляев Ю.М., Клімчук Т.В., Острик В.І., Щокотова О.М. *Контактна механіка. Фрикційна і адгезійна взаємодія поверхонь: колективна монографія*. Львів : Видавель Вікторія Кундельська, 2022. 254 с. ISBN 978-617-8116-10-1 [https://www.researchgate.net/publication/357335537\\_Kontaktna\\_mehanika\\_Frikcijna\\_i\\_adgezijna\\_vzaemodia\\_poverhon](https://www.researchgate.net/publication/357335537_Kontaktna_mehanika_Frikcijna_i_adgezijna_vzaemodia_poverhon)
  32. *The scientific paradigm in the context of technological development and social change : Scientific monograph. Part I. Comparative analysis of structure formation and properties of PVD coatings TiN, Ti/TiN and TiN-MON.* N. Pinchuk. (pp. 504–526). Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2023. 532 p. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-297-5-19>
  33. Ткачук М. М., Пінчук Н. В., Ткачук Г. В. [та інш.] Нові фізичні чинники за контактної взаємодії пружних тіл уздовж поверхонь близької форми. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2022. № 2. С. 94–126. <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2022.2.10>

## References

1. Barber J.R. (2019). *Contact Mechanics*. Springer International Publishing, 585 p.
2. Runar L. Berge, etal. (2020). Finite volume discretization for poroelastic media with fractures modeled by contact mechanics. *IJNME*, 121(4), 571–777:10.1002/nme.6238
3. Li Q., Pohrt R., Lyashenko I. A., Popov V. L. (2019). Boundary element method for nonadhesive and adhesive contacts of a coated elastic half-space. *Proc. Inst.Mech. Eng. J*, 234, 73–83.
4. Violano G., Papangelo, A., Ciavarella, M. (2021) Stickiness of randomly rough surfaces with high fractal dimension: is there a fractal limit?, *Tribology International*, 159, 106971
5. Martynyak, R., Torskaya, E., Xu, Y. (2020). Friction and Multi-Field Problems in Sliding Contacts. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 6, 76
6. Li, Q. and Popov, V. L. (2020). Non-adhesive contacts with different surface tension inside and outside the contact area. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 6, 63
7. Schalk, N., Tkadletz, M., Mitterer, C. (2022). Hard coatings for cutting applications: Physical vs. chemical vapor deposition and future challenges for the coatings community, *Surface and Coatings Technology*, 429, 27949
8. Maksakova, O., Pogrebnyak and others. (2019). Study of advanced nanoscale ZrN/CrN multilayer coatings. *East-European Journal of Physics*, 2, 27–32.
9. Kale C., Turnage S., Garg P., Adlakha I., Srinivasan S., Hornbuckle B.C., Darling K., Solanki K.N. (2019). Thermomechanical strengthening mechanisms in a stable nanocrystalline binary alloy – A combined experimental and modeling study. *Materials & Design*, vol. 163, 107551. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107551>
10. Chepkov, I. B. (2021). Vykorystannia peredovykh naukovykh znan, tekhnolohichnykh rozrobok ta innovatsii dlia zmitsnennia oboronozdatnosti derzhavy ta dosiahnennia viiskovoi perevahy u tekhnolohichnii sferi. *Visnyk NAN Ukrainy*, (6), 59–62.
11. Li, Q., Pohrt, R., Lyashenko, I. A., Popov, V. L. (2018). Boundary element method for nonadhesive and adhesive contacts of a coated elastic half-space. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 1350650119854250.
12. Ciavarella M. (2015). Adhesive rough contacts near complete contact. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 104, pp. 104–111.
13. Pohrt R., Popov V. L. (2013). Contact stiffness of randomly rough surfaces. *Scientific reports*, vol. 3(1): 3293.
14. Persson BNJ. (2001). Elastoplastic contact between randomly rough surfaces. *Physical Review Letters*, vol. 87(11), pp. 116101.
15. Li Q., Popov V. L. (2019). Adhesive contact between a rigid body of arbitrary shape and a thin elastic coating. *Acta Mechanica*, vol. 230, iss. 7, pp. 2447–2453.
16. Sobol, O. V., Pinchuk, N. V., Meylekhov, A. A., Subbotina, V. V., Dur, O., Stolbovoy, V. A., & Kovtoba, D. V. (2020). Structural engineering of multi period (TiMo) N/ZrN vacuum arc coatings. *Functional materials*, 4, 737. <https://doi.org/10.15407/FM27.04.736>
17. Postelnyk, H. O., Pinchuk, N. V., Meylekhov, A. A., Zhadko, M. A., Andreev, A. A., & Stolbovoy, V. A. (2021). Influence of Bias Potential Magnitude on Structural Engineering of ZrN-Based Vacuum-Arc Coatings. *Physics and Chemistry of Solid State*, 22(1), 66-72. <https://doi.org/10.15330/PCSS.22.1.66-72>
18. Subbotin O. V., Bilozero V. V., Volkov O. O., Subbotina V. V., Shevtsov V. M. Fryktsiini vlastyvoli MDO-pokryttiv na aliuminievykh splavakh *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Serii: *Mashynoznavstvo ta SAPR*. 2022, no. 2, pp. 59–63
19. Subbotina, V., Sobol, O., Belozero, V., Subbotin, A., Smyrnova, Y. (2020). A study of the phase-structural engineering possibilities of coatings on D16 alloy during micro-arc oxidation in electrolytes of different types, *Eastern-european journal of enterprise technologies*, vol. 4, no. 12 (106), pp. 14–23.
20. Matykina, E., Arrabal, R., Mohedano, M., Mingo, B., Gonzalez, J., Pardo, A. (2017). Recent advances in energy efficient PEO processing of aluminium alloys, *Transactions of nonferrous metals society of China*, vol. 27, pp. 1439–1454.

21. Sobol', O., Dur, O. (2020). Structural Engineering of Nanocomposite Coatings Based on Tungsten and Titanium Carbides. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Zajac, J., Peraković, D. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7\\_54](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_54)
22. Bourebia M, Laouar L, Hamadache H, Dominiak S. Improvement of surface finish by ball burnishing: approach by fractal dimension. *Surface Engineering*. 2017;33(4):255-262. doi:10.1080/02670844.2016.1232778
23. Musil J., Kos Š., Zenkin S., Čiperová Z., Javdošňák D., Čerstvý R. (2018).  $\beta$ - (Me<sub>1</sub>, Me<sub>2</sub>) and MeN<sub>x</sub> films deposited by magnetron sputtering: Novel heterostructural alloy and compound films. *Surface and Coatings Technology*, vol. 337, pp. 75–81. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.12.057>
24. Trémolières R., Lions J.-L., Glowinski R. *Numerical Analysis of Variational Inequalities*. Amsterdam: Elsevier, 2011. 775 p.
25. Martyniak R. M., Prokopyshyn I. A., Prokopyshyn I. I. (2015). Contact of elastic bodies with nonlinear Winkler surface layers. *Journal of Mathematical Sciences*, 3, vol. 205, iss. 4, pp. 535–539.
26. Zhao J., E. Vollebregt, C. (2016). Oosterlee Extending the BEM for elastic contact problems beyond the half-space approach. *Mathematical Modelling and Analysis*, vol. 21 (1), pp. 119–141.
27. Kinderlehrer D., Stampacchia G. An Introduction to Variational Inequalities and Their Applications. *Classics in Applied Mathematics* (Том 31). SIAM, 2000. 333 p.
28. Prokopyshyn I. I. (2022). Thermomechanical Contact of Elastic Bodies with Nonlinear Winkler Surface Layers. *Journal of Mathematical Sciences*. 265(21-26). DOI:10.1007/s10958-022-06068-4
29. Tkachuk N.N., Lvov H.Y., Hrabovskiy A.V., Skrypchenko N.B. Kontaknoe vzaymodeistviye elementov mashyn s nelyneino uprugym promezhutochnym sloem [Contact interaction of machine elements with a nonlinear elastic intermediate layer]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut»*. Kharkiv, NTU «KhPI». 2018, no. 33 (1309), pp. 43–63.
30. Tkachuk M. M. *Kontaktna mekhanika til iz urakhuvanniam neliniinykh vlastyivostei poverkhnevyykh ta promizhnykh shariv: monohrafiya*. Vydannia druhe. Dnipro: Vydavets Obdymko Olha Stanislavivna, 2023. 255 p.
31. Martyniak R.M., Malanchuk N.I., Kuzmenko V.I., Mykhalchuk H.I., Chumak K.A., Tkachuk M.M., Streliaiev Yu.M., Klimchuk T.V., Ostryk V.I., Shchokotova O.M. *Kontaktna mekhanika. Fryktsiina i adheziina vzaiemodiia poverkhon: kolektyvna monohrafiya*. Lviv : Vydavets Viktoriia Kundelska, 2022. 254 p. ISBN 978-617-8116-10-1 [https://www.researchgate.net/publication/357335537\\_Kontaktna\\_mekhanika\\_Fryktsiina\\_i\\_adhez\\_iina\\_vzaiemodiia\\_poverhon](https://www.researchgate.net/publication/357335537_Kontaktna_mekhanika_Fryktsiina_i_adhez_iina_vzaiemodiia_poverhon)
32. *The scientific paradigm in the context of technological development and social change : Scientific monograph. Part 1. Comparative analysis of structure formation and properties of PVD coatings TiN, Ti/TiN and TiN-MON.* N. Pinchuk. (pp. 504–526). Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2023. 532 p. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-297-5-19>
33. Tkachuk M. M., Pinchuk N. V., Tkachuk H. V. [ta insh.] *Novi fizychni chynnyky za kontaktnoi vzaiemodii pruzhnykh til uzdovzh poverkhon blyzkoi formy. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. 2022, no. 2, pp. 94–126. <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2022.2.10>

*Надійшла (received). 12.12.2023*

#### *Відомості про авторів / About the Authors*

**Ткачук Микола Миколайович / Tkachuk Mykola M.** – доктор технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Інформаційні технології і системи колісних та гусеничних машин ім. О. О. Морозова», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4753-4267>, тел.: (057)7076902, e-mail: m.tkachuk@tmm-sapr.org.

**Пінчук Наталія Володимирівна / Pinchuk Nataliya** – кандидат фізико-математичних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Матеріалознавство», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0954-2266>; тел.: (057) 707-64-35; e-mail: spirinatalia@gmail.com

**Мейлехов Андрій Олександрович / Meilekhov Andrii** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Матеріалознавство», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8142-6024>; e-mail: meilekhov@gmail.com

**Рябоштан Валентин Анатолійович / Riaboshtan Valentyn** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри «Матеріалознавство», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5826-5085>; e-mail: obibobbivalkinobi@gmail.com

**Ткачук Микола Анатолійович / Tkachuk Mykola A.** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4174-8213>; тел.: (057) 707-69-02; e-mail: tma@tmm-sapr.org

**Грбовський Андрій Володимирович / Grabovskiy Andrey** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6116-0572>; e-mail: andrej8383@gmail.com

**Сериков Володимир Іванович / Sierykov Volodymyr** – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-64-78; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5295-3925>; e-mail: SerikovVI@tmm-sapr.org