

*А. В. ГРАБОВСЬКИЙ, М. А. ТКАЧУК, В. І. СЕРИКОВ, М. М. ТКАЧУК, І. П. ГРЕЧКА, О. І. ЗІНЧЕНКО,
А. Ю. ВАСИЛЬЄВ, О. В. БОНДАРЕНКО, О. С. ЛЬОЗНИЙ, І. Я. ХРАМЦОВА, С. І. МАРУСЕНКО*

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СВІТОВОГО РІВНЯ ТАКТИКО-ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БОЙОВИХ БРОНЬОВАНИХ МАШИН ШЛЯХОМ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЄКТНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ЕЛЕМЕНТІВ МЕХАНІЗМІВ ЗАРЯДЖАННЯ: БАЗОВІ ПІДХОДИ ТА МОДЕЛІ

Робота спрямована на забезпечення високих тактико-технічних характеристик вітчизняних бойових броньованих машин шляхом підвищення контактної міцності найбільш відповідальних та навантажених елементів механізмів заряджання. Це викликано тим, що в силу умов ведення бойових дій у сучасних умовах різко зростають навантаження на ці елементи бойових броньованих машин. У таких умовах традиційні методи розрахунків контактної міцності цих елементів за умовними напруженнями із поправочними коефіцієнтами незастосовні. Тому у ході досліджень здійснено удосконалення моделей контактної взаємодії на основі розвитку теорії варіаційних нерівностей. У цю модель привносяться як варіювані та шукані модифікації форми робочих поверхонь контактуючих елементів бойових броньованих машин та властивості матеріалів поверхневих шарів. Здійснено пошук прогресивних проєктно-технологічних рішень цих елементів. Завдяки цьому можливе створення механізмів заряджання нового покоління, які дають можливість зростання калібру снарядів озброєння та темпу здійснення стрільби із перспективного штатного озброєння. Такі прогресивні рішення дають можливість забезпечити тактико-технічні характеристики вітчизняних перспективних бойових броньованих машин на світовому рівні. Установлені закономірності впливу варіюваних параметрів (геометричної форми та властивостей поверхневих шарів) на контактну міцність елементів механізмів заряджання бойових броньованих машин. Зокрема, виявлено суттєву несиметрію області контактної взаємодії роликів із приводними «зірочками». Цей ефект викликаний загальним деформуванням, у першу чергу, – роликів. При цьому область контакту зміщується до периферії робочої поверхні. Відповідно, модифікація цієї робочої поверхні (формування «бочки») позитивно впливає на навантажувальну здатність контактуючих елементів. Рівні контактного тиску та еквівалентних напружень за Мізесом знижуються.

Ключові слова: бойова броньована машина, контакт, напружено-деформований стан, тактико-технічна характеристика, механізм заряджання

*A. GRABOVSKIY, M. A. TKACHUK, V. SIERYKOV, M. M. TKACHUK, I. HRECHKA, O. ZINCHENKO
A. VASYLIEV, O. BONDARENKO, O. LOZNYI, I. KHRAMTSOVA, S. MARUSENKO*

ENSURING THE WORLD-CLASS TACTICAL AND TECHNICAL CHARACTERISTICS OF COMBAT ARMORED VEHICLES BY SUBSTANTIATING THE DESIGN AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR ELEMENTS OF LOADING MECHANISMS: BASIC APPROACHES AND MODELS

The work is aimed at ensuring high tactical and technical characteristics of domestic armored combat vehicles by increasing the contact strength of the most critical and loaded elements of the charging mechanisms. This is due to the fact that due to the conditions of combat operations in modern conditions, the load on these elements of armored combat vehicles is sharply increasing. In such conditions, traditional methods for calculating the contact strength of these elements by conditional stresses with correction factors are not applicable. Therefore, in the course of research, we improved the models of contact interaction based on the development of the theory of variational inequalities. This model includes both variable and sought-after modifications of the shape of the working surfaces of the contacting elements of armored combat vehicles and the properties of the materials of the surface layers. A search for progressive design and technological solutions for these elements has been carried out. This makes it possible to develop a new generation of charging mechanisms that allow for an increase in the caliber of weapon projectiles and the rate of fire from advanced standard weapons. Such advanced solutions make it possible to ensure the tactical and technical characteristics of domestic advanced armored combat vehicles at the world level. The regularities of the influence of the varied parameters (geometric shape and properties of surface layers) on the contact strength of the elements of the charging mechanisms of armored combat vehicles are established. In particular, a significant asymmetry of the area of contact interaction between rollers and drive sprockets was found. This effect is caused by the general deformation, first of all, of the rollers. In this case, the contact area is shifted to the periphery of the working surface. Accordingly, the modification of this working surface (the formation of a “barrel”) has a positive effect on the load capacity of the contacting elements. The levels of contact pressure and equivalent Mises stresses decrease.

Keywords: armored combat vehicle, contact, stress-strain state, tactical and technical characteristics, loading mechanism

Вступ. Як свідчить досвід бойових дій у рамках боротьби проти широкомасштабної агресії із боку російського агресора, вітчизняні бойові броньовані машини (ББМ) продемонстрували, з одного боку, можливості протидії ворожій техніці, а, з іншого боку, – необхідність підвищення їх тактико-технічних характеристик (ТТХ) із огляду на різко збільшені навантаження та дію чинників ураження при виконанні бойових задач. При цьому продемонстровано, що вітчизняні бойові броньовані машини мають значний резерв модернізації, у т.ч. у перспективі – у напрямку створення на їх базі роботизованих бойових платформ. Зокрема, важливо підвищувати калібр озброєння і темп стрільби за рахунок удосконалення механізмів заряджання (МЗ) ББМ.

Актуальна технічна проблема, що сформувалася, тягне за собою здійснення досліджень контактної міцності найбільш навантажених і відповідальних елементів конструкцій механізмів заряджання. Ці деталі мають складну форму, яка забезпечує, по-перше, складний

взаємний рух цих деталей зі спряженими, а, по-друге, – їх контактну міцність. Більш того, в силу близькості контактуючих поверхонь незастосовні традиційні аналітичні та чисельні методи. Це викликано тим, що аналітичні моделі виходять у цьому випадку за межі області застосування. Крім того, чисельна апроксимація призводить до похибок в описі геометричної форми у зоні контактної взаємодії. На додаток, стає дуже важливим чинник місцевих деформацій, зумовлений властивостями поверхневих шарів деталей. А це на пряму переводить проблему у площину розроблення проєктно-технологічних рішень, тобто визначення форми та модифікації робочих поверхонь, а також режимів зміцнення їхніх поверхневих шарів.

Отже, у науковому плані виникає нова актуальна проблема удосконалення підходів,

© А.В. Грабовський, М.А. Ткачук, В.І. Сериков, М.М. Ткачук, І.П. Гречка, О.І. Зінченко, А.Ю. Васильєв, О.В. Бондаренко, О.С. Льозний, І.Я. Храмцова, С. І. Марусенко, 2024

моделей та методів, а також здійснення із їх застосуванням досліджень контактної взаємодії та напружено-деформованого стану механізмів заряджання бойових броньованих машин задля формування рекомендацій із підвищення їх контактної міцності на основі визначення проектно-технологічних рішень стосовно форми та зміцнення. На це спрямовані розробки та дослідження, описані у роботі.

Аналіз методів досліджень міцності елементів озброєння та військової техніки. На теперішній час проблема забезпечення ГТХ озброєння та військової техніки (ОВТ) набула характеру системної. Відповідно, і підхід до її вирішення має системний характер [1–4]. У низці попередніх робіт [1–4] такий підхід задекларований та описаний у загальному вигляді. Проте реалізація такого підходу стосовно конкретного класу ОВТ має свої особливості, які становлять суттєву перепону для його реалізації у тому чи іншому випадку. Зокрема, відсутній деталізований підхід до вирішення проблеми обґрунтування удосконалених технічних рішень елементів МЗ ББМ із урахуванням відчутно підвищених (порівняно із попередниками) потоків потужності, що через них мають проходити.

При цьому існуючі традиційні методики розрахунку цих проблемних елементів, по-перше, виходять за межі області свого застосування, а, по-друге, вони не вмонтовуються у запропоновані стратегії [1–4].

Ще одна із проблемних сторін – аналіз контактної взаємодії (КВД) та напружено-деформованого стану (НДС) складнопрофільних тіл (СПТ). Традиційні методики орієнтовані на використання т.з. «умовних напружень». Ці «умовні напруження» вираховуються на основі розв'язання задачі Герца, а усі інші чинники (вплив шорсткості, модифікації форми, похибок обробки чи монтажу тощо) «зашиваються» у певні коригуючі коефіцієнти.

Цей підхід для випадку контакту складнопрофільних тіл близької форми, які переважають у складі нових конструкцій, принципово не підходить. Необхідно переходити від «умовних» до дійсних діючих напружень. А це, у свою чергу, вимагає переходу до більш складних моделей КВД та НДС.

Зокрема, це методи теорії варіаційних нерівностей та метод скінченних елементів (МСЕ) [4–6]. Вони створюють можливості більш адекватного моделювання контактної взаємодії та НДС складнопрофільних тіл із урахуванням широкої множини чинників. Проте пряме застосування цих розробок [4–6] для дослідження контактної взаємодії та НДС елементів механізмів заряджання неможливе через специфіку їх конструкцій та технологій виготовлення. Зокрема, що стосується, по-перше, геометричної форми робочих поверхонь цих елементів, то ці поверхні із міркувань підвищення контактної міцності прагнуть зробити якомога ближчими за формою. За цих обставин починають усе більшу роль відігравати, по-друге, властивості шорсткості поверхневих шарів матеріалів (та технологій їх зміцнення), покриттів тощо. Відповідно, потрібне розроблення моделей властивостей так званої «контактної жорсткості» цих поверхневих шарів. Цьому присвячено значну кількість робіт [7–9]. У цих роботах сформовані різні типи таких моделей. Вони

базуються на стержневих, циліндричних, сферичних, фрактальних та інших типах поверхневих мікронерівностей. По-третє, основною перепону для аналізу контактної взаємодії та НДС елементів реальних конструкцій, наприклад, механізмів заряджання ББМ, є якраз поєднання у єдиній моделі підходів теорії варіаційних нерівностей, методів опису геометричної форми контактуючих поверхонь та моделей властивостей поверхневих шарів матеріалів.

Тобто, основною проблемою при цьому є поєднання мікро-, мезо- та макромоделей у єдиній інтегрованій моделі контактної взаємодії. Якраз така модель натеper відсутня, і це стримує відповідні дослідження контактної взаємодії та напружено-деформованого стану тіл складної форми. І, нарешті, задля розв'язань задач синтезу необхідно модель аналізу (яку ще потрібно створити) «зав'язати» у модель цілеспрямованого пошуку прогресивних проектно-технологічних рішень. Якщо звернутися до методів чисельного моделювання НДС контактуючих тіл, то серед них лідирує МСЕ у різних його модифікаціях [10]. З одного боку, він має багатий арсенал інструментарію моделювання. З іншого боку, він привносить додаткові похибки моделювання напружено-деформованого стану. На завершення слід зазначити, що розробки та дослідження, описані у роботах [1–10], мають значні вади із точки зору їх застосування до розв'язання сформульованих задач.

З іншого боку, у низці робіт [11–16] розроблені моделі, підходи та методи, які дають можливість, на розвиток [17–24], здійснювати аналіз КВД та НДС контактуючих тіл складної форми. Разом із тим необхідно здійснити їх адаптацію до розв'язання окремих задач досліджень стосовно тих чи інших об'єктів. Отже, виникає потреба у таких розробках та дослідженнях задля забезпечення контактної міцності елементів МЗ ББМ.

Мета роботи – апробація методів підвищення тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин шляхом підвищення контактної міцності елементів механізмів заряджання на основі обґрунтування модифікації геометричної форми та властивостей матеріалів поверхневих шарів контактуючих деталей.

Завдання:

1) удосконалення варіаційних формулювань задач контактної взаємодії та напружено-деформованого стану деталей механізмів заряджання шляхом параметризації геометричної форми та властивостей матеріалів їхніх поверхневих шарів;

2) дослідження контактної взаємодії та напружено-деформованого стану елементів механізмів заряджання бойових броньованих машин.

Базові підходи до розв'язання поставлених завдань. У напрямку заявлених розробок та досліджень розроблені теоретичні основи аналізу контактної взаємодії складнопрофільних тіл за збурення їх геометричної форми та властивостей поверхневих шарів [11–16]. У результаті для аналізу контактної міцності елементів конструкцій удалося відмовитися від спрощених методик та визначення умовних напружень за допомогою коригуючих коефіцієнтів. Навпаки, вираховуються дійсні

напруження та дійсні області контакту. Окрім того, розроблено методи аналізу чутливості цих напружень та області до збурення геометричної форми та властивостей поверхневих шарів матеріалу контактуючих деталей. А уже на цій основі можлива постановка та розв'язання обернених задач обґрунтування форми та властивостей матеріалів поверхневих шарів контактуючих деталей за критеріями підвищення контактної міцності.

Так, для елементів двигунів, гідро- та зубчастих передач і механізмів заряджання ББМ ці проєктно-технологічні проблеми є надзвичайно важливими.

Разом із тим напряму існуючі розробки застосовані бути не можуть. Вони потребують продовження, розвитку та адаптації стосовно цього конкретного класу об'єктів із урахуванням особливостей конструкції та технологій їх виготовлення і зміцнення.

Мова йде про перспективні МЗ бойових броньованих машин. До цих елементів пред'являються, окрім вимог контактної міцності, ще й забезпечення певних кінематичних критеріїв. Тобто, збурення геометричної форми контактуючих поверхонь має бути таким, що не порушує кінематичну узгодженість взаємного руху контактуючих деталей.

Таким чином, ставиться задача синтезу прогресивних проєктно-технологічних рішень означених елементів за критеріями контактної міцності та за діючих обмежень кінематичного характеру, на габарити, на властивості матеріалів та технологій їх зміцнення.

У роботі сформувано новий підхід до вирішення проблеми підвищення контактної міцності елементів механізмів заряджання бойових броньованих машин. Він полягає у комплексному системному підході до вирішення проблеми, що постала, у таких напрямках:

1. Формування багаторівневої моделі, що поєднує мікро-, мезо- та макrorівні, а саме:
 - моделі властивості мікроструктури поверхневих шарів;
 - моделі стохастичних та цілеспрямованих збурень розподілу зазору між контактуючими поверхнями;
 - моделі контактної взаємодії тіл за номінально незбуреними поверхнями.

Таким чином, на відміну від традиційних розділених моделей різного рівня, вдається досягнути поєднання різномасштабних чинників у їх взаємозв'язку та взаємовпливі.

2. Метод моделювання контактної взаємодії та напружено-деформованого стану шляхом побудови варіаційного формулювання, яке відрізняється від традиційних багаточисловою структурою:
 - початковим ядром є функціонал, який відповідає контакту гладких тіл із поверхнями номінальної форми;
 - наступні шари у нарощуваному функціоналі відтворюють вплив різних фізичних чинників (шорсткість, напилення, зміцнення тощо), що супроводжують контакт реальних деталей конструкцій.

Завдяки адитивності енергетичних функціоналів (чи то додаткової роботи, чи то повної потенціальної енергії) стає можливим враховувати ту чи іншу множину чинників, гнучко цю множину змінюючи.

3. У роботі створюються спеціалізовані засоби чисельного моделювання контактної взаємодії та НДС контактуючих елементів механізмів заряджання ББМ, які відрізняються від традиційних спеціальних чи універсальних. У підсумку у створюваних засобах, на відміну від існуючих, поєднуються: оперативність та висока точність; швидка переналагоджуваність на новий клас об'єктів; можливість управління процесом чисельного моделювання на будь-якому етапі.

4. На відміну від традиційних підходів, у ході реалізації підходу, що запропонований та який планується удосконалити, відбувається пошук не ізольованих конструктивних чи технологічних рішень, а сумісних проєктно-технологічних рішень. Це створює основу досягнення набагато вищої ефективності такого рішення, ніж за традиційними підходами.

5. На етапі обґрунтування прогресивних технічних рішень елементів механізмів заряджання бойових броньованих машин застосовується розвиток та адаптація методу узагальненого параметричного підходу [11]. При цьому, на відміну від традиційних методів синтезу, варіюваними та шуканими в алгоритмі цілеспрямованого пошуку є не тільки чисельні параметри, але й геометрична форма, технологічні режими виготовлення та зміцнення, структура і властивості поверхневих шарів тощо. Таке розширення параметричного простору на новий клас варіаційних чинників створює принципові переваги при досягненні прогресивних технічних рішень із більш високим рівнем ТТХ бойових броньованих машин, ніж у традиційному випадку.

Математична модель напружено-деформованого стану та контактної взаємодії елементів механізмів заряджання бойових броньованих машин спирається на варіаційну постановку. У цілому вона зводиться до проблеми мінімізації функціоналу повної внутрішньої енергії системи контактуючих тіл [17 – 24]

$$I(u, P, f) \rightarrow \min \text{ на } K. \quad (1)$$

Тут u – поля пружних переміщень, P – масив узагальнених параметрів, які ідентифікують форму та властивості матеріалів (у т.ч. – зміцнених поверхневих шарів), а f – зовнішні навантаження.

Множина K описує умови непроникнення точок поверхонь контактуючих тіл у області спряжених тіл [11]:

$$u_V^\alpha + u_V^\beta \leq \delta_{\alpha\beta}, \quad (2)$$

де u_V^α , u_V^β – нормальні переміщення до поверхонь контактуючих тіл із номерами α , β ;

$\delta_{\alpha\beta}$ – початковий зазор між тілами α і β .

Чисельні моделі напружено-деформованого стану та контактної взаємодії елементів механізмів заряджання бойових броньованих машин.

Розглянемо тестову модель конструкції механізмів заряджання ББМ із умовними розмірами та формами контактуючих деталей (рис. 1).

Досліджувана конструкція містить приводні елементи («зірочки» 1 із фігурними пазами), тягучі рамки 2 та ланки 3 конвеєра, у якому кріпляться снаряди, які ним переміщуються.

Основна контактна взаємодія – між «зірочками» 1 та роликками 2. На рис. 2 наведені скінченно-елементні моделі для аналізу напружено-деформованого стану та контактної взаємодії цих тіл

Відповідно до заявленого у роботі підходу у ході досліджень можливе варіювання форми робочих поверхонь роликків. Базова їх форма – циліндрична зі

округленнями по краях. Ця форма модифікується шляхом формування «бочки» певним радіусом. Тобто при цьому будується торовидна робоча поверхня (рис. 3).

Результати досліджень напружено-деформованого стану та контактної взаємодії елементів механізмів заряджання. На рис. 4 наведені граничні умови: контакт ролика із «зірочкою» та кут її прокручування, а у табл. 1 та на рис. 5, 6 – результати досліджень напружено-деформованого стану та контактної взаємодії тестових елементів механізмів заряджання бойових броньованих машин для різних значень R .

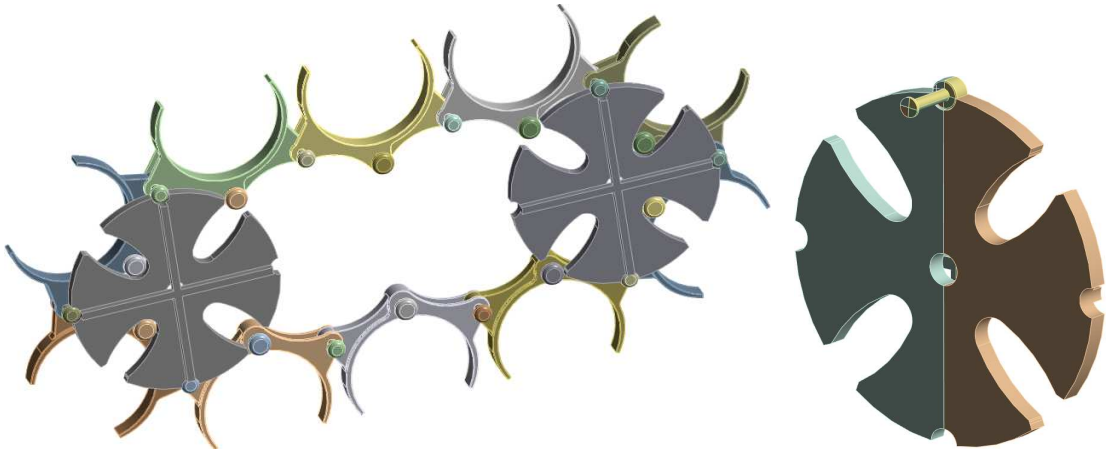


Рисунок 1 – Тестова геометрична модель механізму заряджання (демонстраційна модель)



Рисунок 2 – Скінченно-елементні моделі напружено-деформованого стану контактуючих елементів механізму заряджання

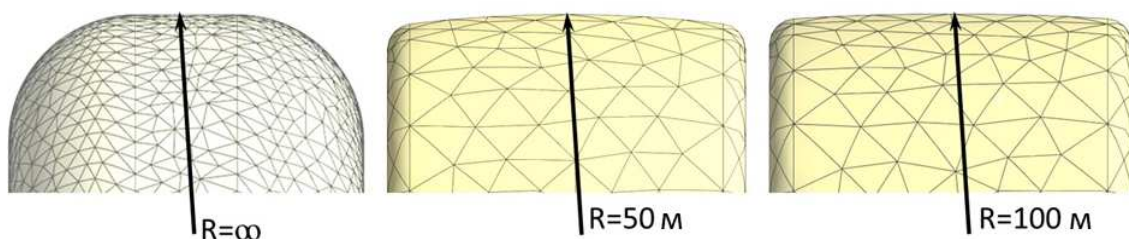


Рисунок 3 – Робочі поверхні роликків механізму заряджання за варіювання радіусів «бочки» на твірній робочій боковій поверхні

Таблиця 1 – Результати досліджень напружено-деформованого стану та контактної взаємодії тестових елементів механізмів заряджання бойових броньованих машин для різних значень R , мм

Параметри НДС	R , мм			
	41.05		82.1	
Повні переміщення, мм				
Розподіл еквівалентних напружень, МПа				
Розподіл контактної тиску, МПа				
	для $R = 123.15$ мм		для $R = 164.2$ мм	
Повні переміщення, мм				
Розподіл еквівалентних напружень (МПа)				
Розподіл контактної тиску (МПа)				

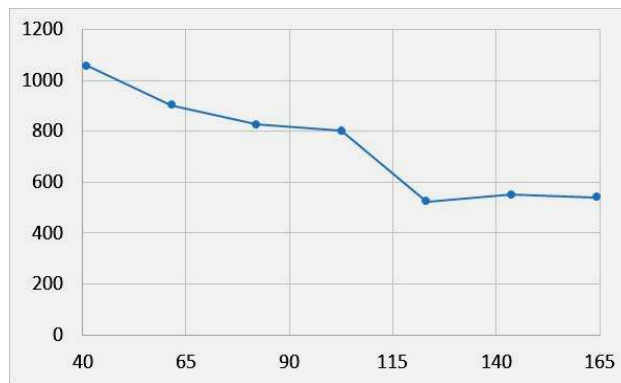


Рисунок 5 – Залежність максимуму еквівалентних напружень (МПа) від зміни радіусу бочки ролика (м)

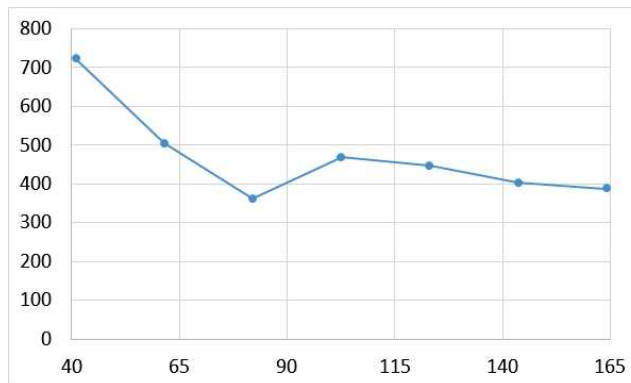


Рисунок 6 – Залежність максимуму контактної тиску (МПа) від зміни радіусу бочки ролика (м)

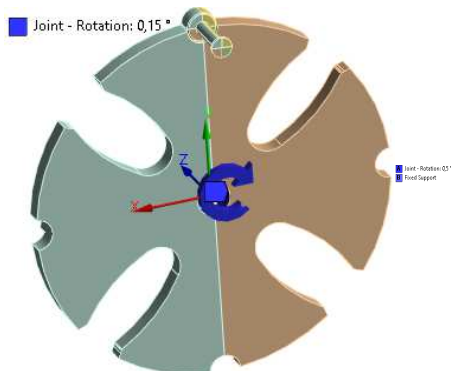


Рисунок 4 – Граничні умови: контакт ролика із «зірочкою» та кут її прокручування

Аналіз результатів досліджень та висновки. Аналіз результатів досліджень напружено-деформованого стану та контактної взаємодії елементів механізмів заряджання бойових броньованих машин свідчить про такі особливості та закономірності.

1. Порівняно із існуючими результатами, викладеними у роботах [1–4], розроблено системний підхід, який охоплює не тільки військово-технічний, але й науковий та проєктно-технологічний аспекти підвищення тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин. Тим самим суттєво розширюється постановка цієї проблеми та, відповідно, очікувана ефективність технічних рішень, що на цій основі обґрунтовуватимуться.

2. Розроблене варіаційне формулювання задач про аналіз контактної взаємодії та напружено-деформованого стану складнопрофільних тіл. На відміну від традиційних постановок теорії

варіаційних нерівностей та методу скінченних елементів [4–6, 17–24], воно розширене на новий клас об'єктів.

По-перше, окрім випадку контакту тіл узгодженої та неузгодженої форми, вводиться до розгляду випадок контакту тіл майже узгодженої форми. По-друге, до системи контактуючих тіл вводяться додаткові елементи, які відображають вплив нових чинників, наприклад, шарів шорсткості, покриттів, проміжних елементів тощо. На відміну від різноманітних моделей [7–9, 17–24], ці моделі можуть мати будь-який закон, що визначає їх властивості. Таким чином, поєднання зазначених нових можливостей розширює клас досліджуваних об'єктів, зокрема, на механізми заряджання БМ.

3. Розроблена удосконалена модель контактної взаємодії тіл складної форми, яка поєднує, на відміну від відомих [4–9], мікро-, мезо- та макрорівні. Це надає більшій адекватності та ширших можливостей моделювання контактної взаємодії та напружено-деформованого стану складнопрофільних тіл у складі бойових броньованих машин.

4. На відміну від традиційного застосування методу скінченних елементів чи інших методів [4, 5, 10, 21–24], для аналізу напружено-деформованого стану контактуючих тіл застосовуються комбіновані спеціалізовані програмно-моделні комплекси. Вони поєднують параметричні моделі, спеціалізовані модулі та універсальні програмні комплекси. Цим різко підвищується оперативність досліджень за збереження їх точності.

5. Установлені закономірності впливу

варійованих параметрів (геометричної форми та властивостей поверхневих шарів) на контактну міцність елементів механізмів заряджання ББМ.

Зокрема, виявлено суттєву несиметрію області контактної взаємодії роликів із приводними «зірочками». Цей ефект викликаний загальним деформуванням, у першу чергу, – роликів. При цьому область контакту зміщується до периферії робочої поверхні. Відповідно, модифікація цієї робочої поверхні (формування «бочки») позитивно впливає на навантажувальну здатність контактуючих елементів. Рівні контактного тиску та еквівалентних напружень за Мізесом знижуються.

Таким чином, розроблені моделі та методи досліджень можуть слугувати основою для поліпшення технічних рішень елементів реальних та проєктованих механізмів заряджання бойових броньованих машин, а також їх зміцнення.

Дослідження виконані за проєктом НФДУ №2023.04/0036 «Дослідження та розробка пристрою для відновлення елементів військової техніки шляхом дискретно-континуального зміцнення конструкцій».

Список літератури

- Чепков І. Б., Олійник І., Коробченко С. О. Процесний підхід в управлінні повним життєвим циклом озброєння та військової техніки на засадах програмно-проєктного менеджменту. *Озброєння та військова техніка*. 2021. № 4. С. 3–11.
- Чепков І. Б., Зубарев В. В., Тютюнник В. П. Новітня стратегія національної безпеки України введена в дію: на черзі оновлення воєнної та військово-технічної політики. *Озброєння та військова техніка*. 2020. № 3. – С. 3–12.
- Чепков І.Б. Використання передових наукових знань, технологічних розробок та інновацій для зміцнення обороноздатності держави та досягнення військової переваги у технологічній сфері. *Вісник Національної академії наук України*. 2021б. №6. С. 59–62. DOI:<https://doi.org/10.15407/vision2021.06.059>.
- Davydovskiy L., Bisyk S., Hutov I., Lilov I., Kuprinenko A., Yalnytskyi O. (2020). Optimization of the parameters of the energy absorbing element of the armored combat vehicle's seat in the conditions of explosive loading. *TRANS & MOTAUTO WORLD*, no. 5(2), pp. 45–47.
- Runar L. Berge, Inga Berre, Eirik Keilegavlen, Jan M. Nordbotten, Barbara Wohlmuth. (2019). Finite volume discretization for poroelastic media with fractures modeled by contact mechanics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 121 (4), 644–663.
- R. Martynyak, E. Torskaya, Y. Xu. (2020). Friction and Multi-Field Problems in Sliding Contacts. *Frontiers in Mechanical Engineering*, vol. 6, p.76.
- 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.
- Li, Q. and Popov, V. L. (2020). Non-adhesive Contacts With Different Surface Tension Inside and Outside the Contact Area. *Frontiers in Mechanical Engineering*, vol. 6, p. 63.
- Violano G., A. Papangelo, M. Ciavarella, (2021). Stickiness of randomly rough surfaces with high fractal dimension: is there a fractal limit? *Tribology International*, vol. 159, 106971.
- Berge R. L., I. Berre, E. Keilegavlen, J. M. Nordbotten, B. Wohlmuth. (2020). Finite volume discretization for poroelastic media with fractures modeled by contact mechanics. *Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 121, Iss. 4, pp. 571–777.
- Ткачук М. М. *Контактна механіка тіл із урахуванням нелінійних властивостей поверхневих та проміжних шарів: монографія*. Дніпро: Видавець Обдимко Ольга Станіславівна, 2022. 255 с.
- Ткачук М.М., Скріпченко Н.Б., Ткачук М.А., Грабовський А.В. *Контактна взаємодія складнопрофільних деталей машинобудівних конструкцій з урахуванням локальної податливості поверхневого шару: монографія*. 3-є вид., перероб. та доп. Харків: ФОП Панов А.Н., 2021. 148 с.
- Ткачук М.А., Кравченко С.О., Ткачук М.М., Грабовський А.В., Веретельник О.В. Дискретно-континуальні методи зміцнення елементів машин військового та цивільного призначення. *Науково-технічні підходи до вирішення актуальних проблем розбудови сектору безпеки і оборони : колективна монографія / за загальною редакцією проф. А.П. Марченка*. Одеса: Видавничий дім «Гельветика», 2021. С. 288–324. (розділ у колективній монографії)
- Tkachuk, M., Grabovskiy, A., Tkachuk, M., Hrechka, I., Tkachuk, H. (2023). Contact Interaction of Solids of Revolution with Surface Perturbation. In: Cioboată, D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2023. ICoRSE 2023. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 762, pp. 504–513. Springer, Cham. Scopus. Conference Paper https://doi.org/10.1007/978-3-031-40628-7_41
- Ткачук М. М., Марченко А. П., Кравченко С. О., Ткачук М. А., Веретельник О. В., Грабовський А. В., Веретельник В. В. Багатокритеріальна оцінка контактної взаємодії дискретно-континуально зміцнених деталей // Двигуни внутрішнього згоряння, 2022, № 1. С. 65–77. <http://dvs.khpi.edu.ua/article/view/264371>
- Ткачук М. М., Пінчук Н. В., Ткачук Г. В., Клочков І. С., Ткачук М. А., Грабовський А. В., Сериков В. І., Гречка І. П., Куценко С. В., Цимбал Г. І., Коба А. М. Нові фізичні чинники за контактної взаємодії пружних тіл уздовж поверхонь близької форми. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ», серія: Машинознавство та САІР*, № 2, 2022. С. 94–126. <http://misapr.khpi.edu.ua/article/view/259901>
- Panagiotopoulos P.D. Inequality problems in mechanics, convex and nonconvex energy functions. Boston, Basel: Birkhäuser Verlag, 1985. P. 196–201.
- Hlavacek I., J. Haslinger, J. Necas [and oth.]. Solution of Variational Inequalities in Mechanics. Berlin, New York: Springer–Verlag, 1988. 327 p.
- Kikuchi N., J.T. Oden Contact Problems in Elasticity: A study of variational inequalities and finite element methods. SIAM Studies in Applied and Numerical Mathematics, Philadelphia. 1986. Vol. 8. P. 156–161.
- Кравчук А. С., Сурьяков В. А. Численное решение геометрически нелинейных контактных задач. Докл. АН СССР, 259:6 (1981), 1327–1329.
- Martynyak R. M., I. A. Prokopyshyn & I. I. Prokopyshyn. Contact of Elastic Bodies with Nonlinear Winkler Surface Layers. *Journal of Mathematical Sciences*, Volume 205, pages 535–553, (2015) <https://link.springer.com/article/10.1007/s10958-015-2265-0>
- Prokopyshyn I. I., I. I. Dyyak & R. M. Martynyak. (2013). Numerical analysis of the problems of contact of three elastic bodies by the domain decomposition methods. *Materials Science*. Volume 49, pages 45–58, <https://link.springer.com/article/10.1007/s11003-013-9581-7>
- Ivan I. Dyyak, Ihor I. Prokopyshyn, Ivan A. Prokopyshyn & Andriy Styahar O. (2024). Numerical Analysis of Contact Between Elastic Bodies in the Presence of Thin Coating and Nonlinear Winkler Surface Layers. *Selected Problems of Solid Mechanics and Solving Methods*, pp 125–142. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-54063-9_9
- Prokopyshyn I. I. & A. O. Styahar (2022). Numerical Analysis of Contact of the Elastic Bodies One of which Has a Discontinuous Thin Coating. *Materials Science*. Volume 57, pages 734–744, <https://link.springer.com/article/10.1007/s11003-022-00602-0>

References (transliterated)

- Чепков І. Б., Олійник І., Коробченко С. О. (2021). Протсесний підхід в управлінні повним життєвим циклом озброєння та військової техніки на засадах програмно-проєктного менеджменту. *Озброєння та військова техніка*, no. 4, pp. 3–11.
- Чепков І. Б., Зубарев В. В., Тютюнник В. П. (2020). Новітня стратегія національної безпеки України введена в дію: на черзі оновлення воєнної та військово-технічної політики // *Озброєння та військова техніка*, no. 3, pp. 3–12.
- Чепков І.Б. (2021б). Використання передових наукових знань, технологічних розробок та інновацій для зміцнення обороноздатності держави та досягнення військової переваги у технологічній сфері. *Вісник Національної академії наук України*, №6, С. 59–62.

- oboronozdatnosti derzhavy ta dosiahnennia viiskovoi perevahy u tekhnolohichnii sferi. Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy, no. 6, pp. 59–62. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2021.06.059>.
4. Davydovskyi Davydovskyi L., Bisyk S., Hutov I., Lilov I., Kuprinenko A., Yalnytyskiy O. (2020). Optimization of the parameters of the energy absorbing element of the armored combat vehicle's seat in the conditions of explosive loading. *TRANS & MOTAUTO WORLD*, no. 5(2), pp. 45–47.
 5. Runar L. Berge, Inga Berre, Eirik Keilegavlen, Jan M. Nordbotten, Barbara Wohlmuth. (2019). Finite volume discretization for poroelastic media with fractures modeled by contact mechanics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 121 (4), 644–663.
 6. R. Martynyak, E. Torskaya, Y. Xu. (2020). Friction and Multi-Field Problems in Sliding Contacts. *Frontiers in Mechanical Engineering*, vol. 6, p.76.
 7. 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.
 8. Li, Q. and Popov, V. L. (2020). Non-adhesive Contacts With Different Surface Tension Inside and Outside the Contact Area. *Frontiers in Mechanical Engineering*, vol. 6, p. 63.
 9. Violano G., A. Papangelo, M. Ciavarella, (2021). Stickiness of randomly rough surfaces with high fractal dimension: is there a fractal limit? *Tribology International*, vol. 159, 106971.
 10. Berge R. L., I. Berre, E. Keilegavlen, J. M. Nordbotten, B. Wohlmuth. (2020). Finite volume discretization for poroelastic media with fractures modeled by contact mechanics. *Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 121, Iss. 4, pp. 571–777.
 11. Ткачук М. М. Контактна механіка тіл із урахуванням нелінійних властивостей поверхневих та проміжних шарів: монографія. Дніпро: Видавець Обдимко Ольга Станіславівна, 2022. 255 с.
 12. Ткачук М.М., Скрипченко Н.Б., Ткачук М.А., Грабовський А.В. Контактна взаємодія складнопрофільних деталей машинобудівних конструкцій з урахуванням локальної податливості поверхневого шару: монографія. 3-є вид., перероб. та доп. Харків: ФОП Панов А.Н., 2021. 148 с.
 13. Ткачук М.А., Кравченко С.О., Ткачук М.М., Грабовський А.В., Веретельник О.В. Дискретно-континуальні методи зміцнення елементів машин військового та цивільного призначення. *Науково-технічні підходи до вирішення актуальних проблем розбудови сектору безпеки і оборони : колективна монографія / за загальною редакцією проф. А.П. Марченка*. Одеса: Видавничий дім «Гельветика», 2021. С. 288-324. (розділ у колективній монографії)
 14. Tkachuk, M., Grabovskiy, A., Tkachuk, M., Hrechka, I., Tkachuk, H. (2023). Contact Interaction of Solids of Revolution with Surface Perturbation. In: Cioboata, D.D. (eds) *International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2023*. ICoRSE 2023. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 762, pp. 504-513. Springer, Cham. Scopus. Conference Paper https://doi.org/10.1007/978-3-031-40628-7_41
 15. Tkachuk M. M., Marchenko A. P., Kravchenko S.O., Tkachuk M.A., Veretelnik O.V., Hrabovskyi A. V., Veretelnik V.V. (2022). Bahatokryterialna otsinka kontaktnoi vzaiemodii dyskretno-kontynualno zmitsnennykh detalei. *Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia*, no. 1, pp. 65–77. <http://dvs.khpi.edu.ua/article/view/264371>
 16. Tkachuk M. M., Pinchuk N. V., Tkachuk H. V., Klochkov I. Ye., Tkachuk M.A., Hrabovskyi A. V., Sierykov V. I., Hrechka I. P., Kutsenko S. V., Tsybmal H. I., Koba A. M. (2022). Novi fizychni chynnyky za kontaktnoi vzaiemodii pruzhnykh til uzdozh poverkhon blyzkoj formy. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI», seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*, no. 2, pp. 94–126.
 17. Panagiotopoulos P.D. *Inequality problems in mechanics, convex and nonconvex energy functions*. Boston, Basel: Birkhäuser Verlag, 1985. P. 196–201.
 18. Hlavacek I., J. Haslinger, J. Necas [and oth.]. *Solution of Variational Inequalities in Mechanics*. Berlin, New York: Springer-Verlag, 1988. 327 p.
 19. Kikuchi N., Oden J.T. (1986). Contact Problems in Elasticity: A study of variational inequalities and finite element methods. *SIAM Studies in Applied and Numerical Mathematics*, Philadelphia, vol. 8, pp. 156–161.
 20. Kravchuk A. S., Sursiakov V. A. (2015). Chyslennoe reshenye heometrychesky nelyneinykh kontaktnykh zadach. Dokl. AN SSSR, 259:6 (1981), 1327–1329.21. R. M. Martynyak, I. A. Prokopyshyn & I. I. Prokopyshyn. Contact of Elastic Bodies with Nonlinear Winkler Surface Layers. *Journal of Mathematical Sciences*, vol. 205, pp. 535–553. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10958-015-2265-0>
 22. Prokopyshyn I. I., I. I. Dyyak & R. M. Martynyak. (2013). Numerical analysis of the problems of contact of three elastic bodies by the domain decomposition methods. *Materials Science*. Vol. 49, pp. 45–58, <https://link.springer.com/article/10.1007/s11003-013-9581-7>
 23. Ivan I. Dyyak, Ihor I. Prokopyshyn, Ivan A. Prokopyshyn & Andriy O. Styahar. (2024). Numerical Analysis of Contact Between Elastic Bodies in the Presence of Thin Coating and Nonlinear Winkler Surface Layers. *Selected Problems of Solid Mechanics and Solving Methods*, pp 125–142. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-54063-9_9
 24. Prokopyshyn I. I. & A. O. Styahar. (2022). Numerical Analysis of Contact of the Elastic Bodies One of which Has a Discontinuous Thin Coating. *Materials Science*. Vol. 57, pp. 734–744, <https://link.springer.com/article/10.1007/s11003-022-00602-0>

Надійшла (received) 12.09.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Грабовський 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>; тел.: (057)7076166, e-mail: andrej8383@gmail.com

Ткачук Микола Анатолійович / Tkachuk Mykola A. – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор 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

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

Ткачук Микола Миколайович / Tkachuk Mykola – доктор технічних наук, старший дослідник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний 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.

Гречка Ірина Павлівна / Hrechka Iryna – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Теорія і системи автоматизованого

проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4907-9170>; тел.: (057)7076534; e-mail: girinap7@gmail.com

Зінченко Олена Іванівна / Zinchenko Olena – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», докторантка кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2961-5861>; e-mail: ez99953@gmail.com

Васильєв Антон Юрійович / Vasiliev Anton – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8106-0950>; e-mail: AVasiliev@tmm-sapir.org

Бондаренко Олексій Вікторович / Bondarenko Oleksiy – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; м. Харків, Україна; тел.: (067) 189-97-00; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2693-5301>; e-mail: avbondko@gmail.com

Льозний Олег Сергійович / Loznyi Oleh – аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: tma@tmm-sapir.org

Храмцова Ірина Яківна / Khrantsova Iryna – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», науковий співробітник, кафедра «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9506-790X>; e-mail: iyakhram@gmail.com

Марусенко Світлана Іванівна / Marusenko Svitlana – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1340-5491>; e-mail: svivmar@ukr.net