

*М. А. ТКАЧУК, А. В. ГРАБОВСЬКИЙ, М. М. ТКАЧУК, А. Ю. ВАСИЛЬЄВ, А. М. КОБА,
В. В. ТРОЦЕНКО, Д. В. КИСЛИЦЯ, А. В. НАБΟКОВ, О. М. РІКУНОВ, О. Є. ШАТАЛОВ,
В. О. КАРПОВ, А. С. БОГАЧ*

МЕТОДОЛОГІЯ ПРОЄКТНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ БРОНЕКОРПУСІВ ЛЕГКОБРОНЬОВАНИХ МАШИН ІЗ НЕТРАДИЦІЙНИХ, ПОВЕРХНЕВО ЗМІЦНЕНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА КОМПОЗИЦІЙ

У роботі розроблено новий підхід до аналізу напружено-деформованого стану бронекорпусів легкоброньованих машин із нетрадиційних, поверхнево зміцнених матеріалів та композицій. На основі розрахунково-експериментальних та розрахунково-розрахункових досліджень пропонується створювати експрес-моделі напружено-деформованого стану цих бронекорпусів. Зокрема, розглядаються багатшарові композиції «сталь – кераміка – сталь», «сталь – тканий матеріал» із різним чергуванням шарів із властивостями, які визначають певні службові характеристики бронекорпусу. Мова йде про балістичну, протимінну та протигуламову (вторинні уламки) стійкість. Крім того, до уваги беруться критерії міцності, жорсткості та стійкості бронекорпусів легкоброньованих машин. Зокрема, ці характеристики впливають на динамічну збудливість від дії реактивних сил віддачі при здійсненні пострілів із високотемпової зброї, у тому числі – малокаліберних автоматичних гармат. Також важливим є вплив на збурення у каналі наведення і стабілізації озброєння, які виникають внаслідок деформування бронекорпусів. Із точки зору стійкості становить інтерес дія надлишкового тиску ударної хвилі від вибухів фугасних зарядів на бронекорпус. У кінцевому результаті бронекорпус має виконувати ще й опорну функцію для усіх систем і агрегатів легкоброньованої машини. Таким чином, виникає проблема здійснення великого обсягу проєктних розрахунків задля обґрунтування прогресивних технічних рішень бронекорпусів із нетрадиційних, поверхнево зміцнених матеріалів та композицій. При цьому виникає проблема побудови розрахункових моделей напружено-деформованого стану таких бронекорпусів за критерієм збалансованості точності та термінів здійснення багатоваріантних розрахунків. Із залученням узагальненого параметричного моделювання пропонується визначити прийнятні експрес-моделі із нетрадиційних, поверхнево зміцнених матеріалів та композицій. Тобто будувється така експрес-модель, яка задовольняє вимоги точності результатів та тривалості розрахунків. Вона створює можливості на перших етапах проєктних досліджень досягти прогресу у задоволенні конкуруючих вимог до бронекорпусів легкоброньованих машин із підвищеними тактико-технічними характеристиками.

Ключові слова: бронекорпус, легкоброньована машина, напружено-деформований стан, експрес-модель, міцність, жорсткість, точність ведення вогню, композит, проєктування

*М. А. ТКАЧУК, А. В. ГРАБОВСЬКИЙ, М. М. ТКАЧУК, А. ВАСИЛЬЄВ, А. КОБА, В. ТРОЦЕНКО,
Д. КИСЛИЦЯ, А. НАБΟКОВ, О. РІКУНОВ, О. ШАТАЛОВ, В. КАРПОВ, А. БОГАЧ*

METHODOLOGY OF DESIGN RESEARCH OF ARMORED HULLS OF LIGHTLY ARMORED VEHICLES MADE OF UNCONVENTIONAL, SURFACE-HARDENED MATERIALS AND COMPOSITIONS

The work develops a new approach to the analysis of the stress-strain state of armored hulls of lightly armored vehicles made of unconventional, surface-hardened materials and compositions. Based on computational-experimental and computational-calculation studies, it is proposed to create express models of the stress-strain state of these armored hulls. In particular, multilayer compositions "steel-ceramics-steel", "steel-woven material" with different alternation of layers with properties that determine certain service characteristics of the armored hull are considered. We are talking about ballistic, anti-mine and anti-fragmentation (secondary fragments) resistance. In addition, the criteria for strength, rigidity and stability of armored hulls of lightly armored vehicles are taken into account. In particular, these characteristics affect the dynamic excitability from the action of reactive recoil forces when firing from high-speed weapons, including small-caliber automatic guns. Also important is the impact on disturbances in the guidance and stabilization channels of weapons that arise as a result of deformation of armored hulls. From the point of view of stability, the effect of excess pressure of the shock wave from explosions of high-explosive charges on the armored hull is of interest. Ultimately, the armored hull must also perform a supporting function for all systems and assemblies of a lightly armored vehicle. Thus, the problem arises of performing a large volume of design calculations to substantiate progressive technical solutions for armored hulls made of unconventional, surface-hardened materials and compositions. At the same time, the problem arises of constructing computational models of the stress-strain state of such armored hulls based on the criterion of balancing the accuracy and timing of multivariate calculations. With the involvement of generalized parametric modeling, it is proposed to determine acceptable express models from unconventional, surface-strengthened materials and compositions. That is, an express model is being built that meets the requirements for the accuracy of results and the duration of calculations. It creates opportunities at the first stages of design research to achieve progress in meeting competing requirements for armored hulls of lightly armored vehicles with increased tactical and technical characteristics.

Keywords: armored hull, lightly armored vehicle, stress-strain state, express model, strength, stiffness, accuracy of fire, composite, design

Вступ. Практика бойових дій 2022–2026 рр. проти країни-агресора виявила низку особливостей, зокрема, стосовно застосування бронетехніки.

По-перше, це різка зміна засобів ураження та доставки боеприпасів до бойових броньованих машин противника. Тобто, виник «пролом» у традиційних варіантах технічних рішень бронекорпусів бойових броньованих машин із залученням відомих бронесталей, кольорових металів, кераміки, пластиків та композитних структур на їх основі.

По-друге, це різке зниження ефективності застосування традиційних зразків озброєння (танкові гармати, малокаліберні автоматичні гармати, кулемети тощо) внаслідок зламу загальноприйнятих тактичних прийомів при веденні бойових дій, у т.ч. – із-за підвищеної уразливості бронемашин (див. вище) в умовах, що на сьогодні

© М. А. Ткачук, А. В. Грабовський, М. М. Ткачук, А. Ю. Васильєв, А. М. Коба, В. В. Троценко, Д. В. Кислиця, А. В. Набоков, О. М. Рікунов, О. Є. Шаталов, В. О. Карпов, А. С. Богач, 2026

склалися.

По-третє, більш рельєфно проступили проблеми із забезпеченням рухливості бойових броньованих машин, особливо – в ув'язці із вищезначеними зрушеннями у розрізі захищеності та вогневої міці. Дійсно, рухливість у сучасних умовах тісно пов'язана із захищеністю, і з вогневою міццю, і її неможливо розглядати ізольовано від них.

Врешті-решт, із одного боку, сформувалася ситуація «ідеального шторму» із точки зору традиційних концепцій забезпечення комплексу тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин. З іншого боку, виникає нагальна необхідність у нових підходах до створення наступних поколінь бойових броньованих машин, які би задовольняли сучасним та перспективним вимогам до їхніх тактико-технічних характеристик.

Таким чином, злам у тактико-тактичних вимогах призводить до зламу у обґрунтуванні технічних рішень бойових броньованих машин, а відтак – у концепціях, моделях, методах та засобах проєктних досліджень, що покладаються в основу усіх етапів створення таких машин із високими тактико-технічними характеристиками.

Якщо розглядати проблему, що виникла, із системної точки зору, то бойова броньована машина потребує кардинальної зміни і двигуна, і рушія, і трансмісії, і бронекорпуса, і озброєння тощо. Більш того, усі ці (див. аргументацію вище) компоненти необхідно змінювати взаємоузгоджено у складі бойової броньованої машини як складної цілісної системи.

Першочерговим у множині проблемних елементів для будь-якої бойової броньованої машини є бронекорпус, оскільки він є її загальнокомпонувальним, силовим та захисним елементом. Особливо це стає актуальним для легкоброньованих машин.

Хронологічно традиційними технічними рішеннями бронекорпусів легкоброньованих машин були зварні конструкції із бронесталей, підсилені внутрішньою силовою структурою (БМП-1,2; БТР-60,70,80; БТР-3,4 та зарубіжні аналоги тощо). Із часом з'явилися альтернативні варіанти корпусів зі сплавів кольорових металів, посилені бронесталевими плитами (БМП-3, Бредлі тощо). Надалі технічні рішення еволюціонували («обростання» бронекорпусів керамічними зовнішніми накладками; застосування рознесених, комбінованих та композиційних захисних структур; залучення активного та динамічного захисту, розташованих ззовні; використання внутрішніх захисних протиуламкових засобів типу кевларовий підбій тощо).

Відповідно, уже склалися певні варіанти технічних рішень для бронекорпусів легкоброньованих машин. Проте, у сьогоднішніх умовах (а особливо – на перспективу) перелічені частинні технічні рішення не забезпечують комплексного вирішення зазначеної проблеми стосовно бронекорпусів легкоброньованих машин.

Отже, необхідно здійснювати пошук більш прогресивних та, звичайно, різноспрямованих комплексних рішень, причому (див. вище) із урахуванням поточної змінюваної множини критеріїв, вимог та обмежень. А для цього потрібно здійснювати серії багатоваріантних досліджень за варіювання багатьох параметрів. Існуючі ж моделі та засоби таких досліджень не забезпечують досягнення поставлених завдань. Більш того, важливо розробити новий загальний підхід до вирішення посталих проблем, маючи на увазі вищезазначену властивість різких змін вимог до проєктованих бойових броньованих машин.

Зокрема, увагу привертають способи побудови математичних і чисельних моделей напружено-деформованого стану бронекорпусів легкоброньованих машин, які набувають вигляду багатоконпонентних структур (бронесталі; сплави кольорових металів; кераміка; пластик; ткани, неткані та мережеві матеріали; поверхнево зміцнені та матеріали із покриттями тощо). При цьому побудова моделей властивостей окремих компонентів уже проблематична, а тим більше – їх композицій. А вони – конче необхідні, особливо – на перших етапах проєктних розробок. Отже, виникає проблема створення експрес-моделей, які мають властивість балансу точності та вимог до обчислювальних ресурсів.

На підвищення описаної проблеми спрямована ця робота.

Аналіз існуючих моделей і методів дослідження реакції тонкостінних конструкцій на дію навантажень. Як зазначено у роботі [1], «...бронекорпуси вітчизняних ЛБМ піддаються дії чинників ураження та силового збурення зі все зростаючою інтенсивністю. Враховуючи різноманітність діючих чинників ураження та їх природи, традиційні рішення бронекорпусів у вигляді просторової зварної конструкції із бронепанелей, виготовлених із гомогенних матеріалів, немає перспектив задоволення усіх вимог до міцності, захищеності, забезпечення привнесення малих збурень у системи наведення і стабілізації власного озброєння тощо. Природно, що у таких умовах привертають увагу альтернативні рішення, зокрема, – застосування композиційних матеріалів. Вони можуть бути різними за складом, структурою, порядком чергування шарів, технологією виготовлення тощо. Зокрема, у багатьох випадках можуть розглядатися як перспективні т.з. «сендвіч-бронепанелі», що містять композиції «сталь – кераміка – сталь», «сталь – пластик – сталь», «сталь – гума – сталь» та інші варіанти» [1].

Враховуючи відзначені обставини, а також те, що подібні підходи до проєктних рішень застосовуються в авіа-, цивільному транспортному машинобудуванні, то становлять інтерес методи розрахунку напружено-деформованого стану подібного типу конструкцій. Мова йде про конструктивні варіанти силових та захисних елементів різного призначення та походження.

Так, у [2] розглянуто принцип роботи

енергопоглинаючого елемента, який полягає у перетворенні кінетичної енергії, набутої в результаті вибуху, в енергію пластичної деформації матеріалу. Для оцінки та вибору елемента розроблено типовий алгоритм його оптимізації. Це дає можливість за допомогою якісних критеріїв при відомому значенні вибухового навантаження обрати раціональні параметри конструкції та матеріалу елемента, які будуть оптимальними для конкретної бойової броньованої машини.

Подібні ж питання розглянуті у роботах [3–14]. У цих роботах мова йде про міцність сплавів, конструкцій та методів їх розрахунку.

Аналіз робіт [2–14] свідчить, що значна увага для випадку транспортних засобів спеціального призначення приділяється питанням балістичного та протимінного захисту. Наприклад, у роботі [14] проведено експериментальні дослідження щодо визначення придатності пористих пресовок з алюмінієвих сплавів для використання у системах пасивної безпеки. Експерименти показали, що застосування зразків з максимальною пористістю дозволяє зменшити енергію удару на величину роботи їх пластичної деформації і руйнування. Порівняння ефективності спрацювання різних зразків продемонструвало, що здатність до поглинання енергії збільшується зі збільшенням пористості елемента [14].

Конструкції та матеріали такого типу можуть бути застосовані у т.ч. при забезпеченні захищеності бойових машин [15–17].

У роботі [18] здійснено моделювання проникнення бронебійних куль Б-32 калібру 12,7 мм у двошарову керамічно-композитну броню. Було проведено дослідження для бронеблоків двох конструкцій. Перша є шаром керамічних квадратних плиток, що спираються на скловолокно або поліамідну тканину. Моделювання та подальші балістичні випробування засвідчили, що утворюється конічна тріщина Герца, локалізована в керамічній плитці. Плитка руйнується від поширення радіальних тріщин, і весь броньовий блок стає нездатним витримувати повторне влучання кулі. У другому випадку бронеблок складається з дискретних циліндричних керамічних елементів, заповнених епоксидною смолою, зі сферичними кінцями. Перевагою такої «дискретної» броні є локалізація зони пошкодження і, таким чином, здатність витримувати багаторазові влучання кулі. Балістичні випробування порівнюваних бронеблоків засвідчили, що обидва забезпечують ефективний додатковий захист легкоброньованої техніки від нормального удару кулі калібру 12,7 мм [18].

У роботі [19] надані результати аналізу та систематизація основних причин, що призводять до виникнення дефектів у зварних корпусах бойових броньованих машин легкої категорії за масою та визначення основних напрямів їх попередження. Показано, що проблема підвищення якості та забезпечення відповідного рівня балістичної та протимінної стійкості зварних

бронекорпусів має комплексний характер, пов'язана зі зварністю застосовуваних на виробництві сталей, організацією та оснащенням зварювального виробництва та конструктивними особливостями корпусів низки вітчизняних броньованих машин.

Також становить інтерес дослідження шаруватих конструкцій.

Так, у [20] зазначено, що тонкостінні конструкції, елементами яких є пластини й оболонки з композитних матеріалів, все ширше застосовуються в різних галузях техніки. Зростаючі потреби практики та впровадження нових композитних матеріалів вимагають подальшого удосконалення методів розрахунку оболонкових конструкцій неоднорідної структури. Тому актуальною є проблема розробки адекватного методу аналізу поведінки оболонок, що виготовлені з композитних матеріалів багатшарової структури. Робота присвячена поширенню розробленого скінченно-елементного методу дослідження геометрично нелінійного деформування та стійкості пружних оболонок на задачі дослідження оболонок, матеріали шарів яких є композитами волокнистої структури. Для моделювання термопружних властивостей неоднорідного матеріалу оболонки застосовується метод структурування неоднорідностей матеріалу за товщиною і в плані оболонки за допомогою універсального просторового скінченного елемента. Визначення ефективних характеристик композитного матеріалу реалізується за структурними мікромеханічними параметрами його компонентів на основі відомих методик прогнозування пружних сталей для даної моделі композитного матеріалу. Багатшаровий скінченний елемент, створений в рамках розробленого підходу, призначений для дослідження тонких пружних оболонок як із традиційних, так і з композитних матеріалів. Наведено результати досліджень багатшарової композитної панелі з використанням різних мікромеханічних методик. Нова модифікація скінченного елемента, що розроблена, дає можливість достовірно, з прийнятною для інженерних розрахунків точністю, досліджувати напружено-деформований стан і стійкість багатшарових оболонок із волокнистих композитних матеріалів [20]. Тут визначення ефективних характеристик матеріалів спирається на застосування та розвитку базових теоретичних положень [21–27].

У роботі [28] зазначається, «що шаруваті багатшаровано-армовані полімерні композити – ламінати – є перспективними композиційними матеріалами, що у порівнянні з металами пропонують відмінну специфічну жорсткість та міцність. Водночас вони демонструють якісно набагато складнішу механічну поведінку, зокрема при руйнуванні, що виникає внаслідок багаторівневої неоднорідності побудови цих матеріалів із істотною анізотропією фізико-механічних властивостей та переважно крихким

характером руйнування на всіх рівнях... Презентуються результати чисельних досліджень напружено-деформованого стану та міцності високоякісних несучих ламінатів на основі вуглепластиків із концентраторами напружень у вигляді навантажених отворів, що виникають в механічних з'єднаннях ламінатів з оточуючими конструктивними елементами» [28].

Шаруваті титан/алюмінієві композиційні матеріали як з чистих металів, так і їх сплавів все активніше досліджують завдяки їх унікальним властивостям. Однак, найбільш поширені твердофазні методи мають низку недоліків, яких можна уникнути, застосовуючи спрощені рідкофазні ливарні технології [28].

У роботі [29] досліджено мікроструктуру межі взаємодії та механічну поведінку при розриванні композиту системи ВТ-6/Al, виготовленого рідкофазним ливарним методом.

«У результаті дослідження механічних властивостей було встановлено, що основним визначальним параметром є співвідношення товщин шарів T_i до Al . Проаналізовано правило сумішей та визначено міцність на розривання для п'яти- та семишарових матеріалів. Незважаючи на те, що значення міцності на розривання отриманих композитів зменшуються у порівнянні з вихідним титаном марки ВТ-6, шаруваті матеріали завдяки своїй структурі можуть підвищувати стійкість до руйнування та позитивно впливати на механізми демпфування. Тому подальше дослідження поведінки шаруватих титан/алюмінієвих композиційних матеріалів під дією напружень, перпендикулярних до їх шарів, є актуальним» [29].

Тут доречними є напрямки технологічних та матеріалознавчих досліджень, описаних у [29–32].

Стосовно аналізу деформування шаруватих конструкцій аерокосмічної техніки при багатофакторному навантаженні, то у [33] зазначено, що «широке застосування конструкцій з композиційних матеріалів пов'язані з їх поліпшеними, порівняно однорідними характеристиками. Завдяки високим якимостям міцності і підвищеної жорсткості у поєднанні з малою вагою композиційні матеріали широко використовуються в космічному, авіа- і суднобудуванні, транспортному машинобудуванні [34–36]. Найбільш повно натеper досліджено питання статичного деформування композитних елементів конструкцій та його вільні коливання. Перехідні процеси у таких конструкціях менш вивчені. Нестационарні процеси у шаруватих елементах конструкцій можуть бути викликані короткочасними інтенсивними навантаженнями різної природи. Ускладнення умов роботи сучасних композитних конструкцій, пов'язане з імпульсними та ударними навантаженнями, різноманітність форм конструктивних елементів, застосування нових матеріалів, призводить до того, що розробка методів розв'язання задач про напружено-деформований стан композитних пластин і оболонок довільної форми є актуальною

задачею динаміки конструкцій.

Пропонується методика дослідження процесів нестационарного деформування шаруватих композитних елементів конструкцій аерокосмічної техніки при імпульсному навантаженні та ударі твердим тілом. Розглядаються шаруваті елементи, які виконані у вигляді пластин та оболонок із складною формою плану, що складається з ортотропних шарів сталої товщини. Пластина або оболонка віднесені до декартової системи координат, пов'язаної із зовнішньою поверхнею першого шару і займає на координатній площині однозв'язну область, яка обмежена криволінійним контуром. Передбачається, що для пакету шарів виконується гіпотеза типу С. П. Тимошенка. Напруження в шарах визначається за законом Гука для ортотропного тіла. Зусилля та моменти визначаються шляхом інтегрування відповідних компонентів тензора напруги вздовж товщини пластини або оболонки.

Рівняння руху елемента конструкції та граничні умови отримано з варіаційного принципу. При розв'язанні задач про ударну взаємодію індентора з конструкцією система рівнянь руху доповнюється рівнянням руху індентора, а також умовою спільності переміщення індентора та конструкції. Контактна взаємодія враховується з урахуванням модифікованого закону Герца. Задача динаміки шаруватої пластини та оболонки довільної форми розв'язується методом занурення. В результаті задача зводиться до розв'язання системи звичайних диференціальних рівнянь другого порядку щодо коефіцієнтів розвинування функцій переміщень у ряді Фур'є. Отримана система інтегрується шляхом розвинування розв'язку у ряд Тейлора» [33].

Пов'язаною із тематикою, що розглядається, є проблематика захисних елементів бронежилетів [37]: «у світі сучасних військових та поліцейських технологій питання особистої безпеки та захисту завжди стоять на першому місці. Серед безлічі новітніх розробок особливо виділяються керамічні бронепластини, які справедливо можна назвати революційним проривом у сфері індивідуального захисту. Ці високотехнологічні компоненти бронежилетів й бронетехніки надають винятковий рівень захисту від куль та осколків, поєднуючи в собі легкість і надзвичайну міцність.

Завдяки використанню передових матеріалів та інноваційних методів виробництва, керамічні бронепластини стали незамінними в арсеналі сучасних захисних засобів, підвищуючи шанси на виживання та зменшуючи ризик поранень у найнебезпечніших ситуаціях» [37].

У [37] зазначено, що для бронеплит «найчастіше використовуються такі види кераміки: алюмінієвий оксид (Al_2O_3); карбід кремнію (SiC); карбід бору (B_4C).

На деякі керамічні бронеплити може наноситися додаткове захисне покриття для підвищення їх стійкості до зношування і

додаткового захисту від механічних пошкоджень.

Завершальним етапом є інтеграція керамічних бронеплит із композитними матеріалами, такими як арамідне волокно або надвисокомолекулярний поліетилен. Це забезпечує додаткову амортизацію і захист» [37].

На відміну від сталених бронеплит, керамічний бронееlement ніколи не «використовується сам, як самостійний матеріал у бронесистемах. Він завжди поєднується з високоміцною полімерною матрицею й текстильно-полімерним затримувальним шаром. Додатково бронепластили можуть оснащуватись підкладкою з надвисокомолекулярного поліетилену.

Керамічні матеріали, як і скло, мають високу твердість і міцність на стиск, але низьку міцність на розтяг. Прикріплення керамічного бронееlementу до композитної основи, що має високу міцність і хорошу пластичність, затримує або пом'якшує руйнування при розтягуванні під час удару.

Керамічні бронесистеми захищають від куль та уламків завдяки двом основним механізмам: дроблення та руйнування. Коли куля влучає в керамічний шар вона на мить затримується. Залежно від товщини і твердості керамічного шару, серцевина кулі розбивається й руйнується. Залишки кулі продовжують проникати в керамічну бронеплиту зі зменшеною швидкістю, що призводить до руйнування цих залишків і зменшення їхньої енергії. Потім шар композитного пластику, що знаходиться за керамічним шаром, затримує уламки кулі і поглинає залишкову кінетичну енергію, як правило, за рахунок пластичної деформації» [37].

Окремий пласт проблем, підходів, моделей та методів досліджень композитних структур, у т. ч. – функціонально-градієнтних матеріалів, висвітлено у роботах [38–47]. Обґрунтовуються теоретичні основи досліджень конструкцій із таких матеріалів, а також будуються моделі для аналізу їх поведінки при навантаженнях, а також – коливань, у т. ч. – вільних.

Окрім металів, сплавів, кераміки, пластмас та композитів із їх поєднанням, у сучасних конструкціях широко застосовуються нетрадиційні матеріали: ткани, неткані та мережеві волоконні матеріали. Для аналізу їх поведінки будуються моделі, що становлять поєднання одновимірних структур (волокон) у 3D областях. Один із варіантів, що має практичну застосовність – мережеві структури, які не занурені у якусь матрицю.

Так, у [48] «...розроблено нову модель для незворотних великих деформацій волоконних мереж. Волокна розглядаються як нерозтяжні троси, що ковзають один відносно одного в місцях фрикційних з'єднань. Це ковзання формується правилом потоку, незалежним від швидкості. Негладкий потенціал дисипації для кожної системи ковзання визначається як добуток межі текучості та абсолютного значення ковзання

волокна. Відгук сегментів троса також є негладким, оскільки демонструє асиметрію відносно розтягу та стиснення. Для рівноважного інкрементального навантаження мережі при великих деформаціях виведено принцип мінімального інкрементального потенціалу та принцип чистої додаткової енергії. Вони утворюють пару первинних та подвійних задач конічного програмування другого порядку з узгодженими наборами змінних на основі переміщень та сили. Ці задачі можна ефективно вирішити методами внутрішніх точок, які мають багато переваг порівняно з градієнтними методами або динамічною релаксацією. Модель розширена простим механізмом висмикування волокон внаслідок ковзання волокна на вільних незв'язаних кінцях. Це можна використовувати для мікроструктурного аналізу руйнування голкопробивних нетканних матеріалів» [48].

При цьому розроблені та розвинені моделі поведінки такого типу матеріалів викладені у [48–60]. Зокрема, у [59] «...розширено метод максимальних шляхів просування на випадок пружної гомогенізації матеріалів із композитною сітчастою мікроструктурою. У поданнях мікрореформацій мережі введено деякі розподіли векторів розтягування ланок для кожного компонента. На основі уточненої статистики орієнтацій ланок у максимальних шляхах просування отримано нове формулювання кінематичного співвідношення, що пов'язує ці мікромеханічні змінні з макроскопічними деформаціями в матеріалі. Задача визначення балансу мережі вирішується шляхом проміжного осереднення деформацій та реакції ланок з однаковими початковими орієнтаціями. У результаті різні компоненти мережі замінюються еквівалентною ланкою. У рамках запропонованої моделі встановлено послідовний характер їх з'єднання та передачі зусиль у мережі. Також проаналізовані якісні відмінності в поведінці матеріалів із різною структурою, які можна пояснити геометричними та фізичними властивостями елементів композитних сітчастих мікроструктур» [59].

Загальним висновком із наведеного аналізу публікацій можна констатувати, що, попри значні просування у різних напрямках, відсутні завершені підходи та моделі поведінки конструкцій із нетрадиційних матеріалів та композицій. Що ж стосується напрямку досліджень бронекорпусів легкоброньованих машин, то ця ситуація незавершеності поглиблюється тим, що постійно пропонуються все нові й нові матеріали, технології, структури та композиції, які не підпадають під уже розроблені моделі. Відповідно, необхідно розробити нові підходи для експрес-аналізу поведінки бронекорпусів легкоброньованих машин із нетрадиційних матеріалів та композицій, які можна було би застосувати для оперативного здійснення проектних досліджень бронекорпусів, які пропонується виготовляти за тією чи іншою

технологією із тих чи інших матеріалів. При цьому кількість матеріалів – надзвичайно велика, і потрібно досягати балансу точності та оперативності досліджень.

Саме вирішення сформованої проблеми становить мету цієї роботи.

Підхід до побудови математичних і чисельних моделей напружено-деформованого стану бронекорпусів легкоброньованих машин. Якщо мати на увазі, що повна система розв'язувальних рівнянь теорії пружності у просторовій постановці [61] для аналізу напружено-деформованого стану бронекорпусів легкоброньованих машин (навіть із гомогенних бронематеріалів) призводить до необхідності залучення при чисельній реалізації розрахунків занадто великих обчислювальних ресурсів, то необхідно залучати їх редуковані варіанти. Зокрема, мова йде про перехід від формулювань у просторових координатах 3D області до формулювань, визначених на 1D та 2D областях (або їх поєднаннях). Це призводить до залучення моделей стержнів, пластин і оболонок, які базуються на тих чи інших моделях (Бернуллі, Кірхгофа-Лява, Тимошенка, Рейсснера тощо [62]). На розвиток цих моделей можна їх «нарошувати» на випадки багат шарових (багатокомпонентних) композицій. Тоді у операторному вигляді таку редуковану систему розв'язувальних рівнянь можна подати у вигляді

$$L(u, p, f, t) = 0, \quad (1)$$

де L – деякий оператор,

u – змінні стану,

f – навантаження,

t – час,

p – параметри, що визначають поточний варіант досліджуваного об'єкта.

Тут (1) діють на множині поверхонь S та ліній L і точок Q , на яких сформовані відповідні редуковані рівняння.

Важливою особливістю (1) є інтегрована у них параметрична залежність від параметрів p , у т.ч. – опис структури і властивостей складових багат шарових (багатокомпонентних) композицій.

Рівняння (1) мають, окрім інших, також і дві визначальні особливості:

1) сама система розв'язувальних рівнянь (1) залишається достатньо громіздкою;

2) у силу невизначеності властивостей окремих компонент p невизначеними є сукупні властивості усієї композиції.

При цьому більшу акцентацію слід здійснити на п. 2): невизначеність властивостей окремих компонентів чинить такий сильний вплив, що знецінює збереження у силі (1) (тобто п. 1)).

Зазначена аргументація призводить до доцільності трансформації (1) до варіанту експрес-моделі

$$L^{\sim}(u^{\sim}, p^{\sim}, f^{\sim}, t) = 0, \quad (2)$$

де складові « \sim » корелюють із складовими « $*$ » за певними залежностями.

Тобто, маємо визначені «двоспрямовані» проєкції між такими множинами складових. Зокрема, центральне місце займає відповідність у парі

$$p \leftrightarrow p^{\sim}. \quad (3)$$

Найбільш раціональним видається перехід до такої моделі (2), яка уже реалізована чисельно, у першу чергу – у вигляді скінченно-елементної моделі

$$L_N^{\sim}(u_N^{\sim}, p_N^{\sim}, f_N^{\sim}, t) = 0, \quad (4)$$

де нижні індекси « N » відповідають чисельним відповідникам у (2).

Стіввідношення (2), (4) визначають сукупно із (3) експрес-моделі, що можуть відтворювати реакцію системи (1) на дію навантажень. Якщо при цьому вважати коректним (натепер – достатньо відпрацьованим) перехід (2)-(4) (тобто – перехід від континуальної до дискретної моделі, наприклад за допомогою методу скінченних елементів [63]), залишається найбільш впливовим у зазначеному ланцюгу (1)-(4) саме правило (3). Тут мова йде про правило формування «зведених» («еквівалентних») властивостей параметрів p^{\sim} (а через них – p_N^{\sim}).

Ще одним із джерел «волатильності» при побудові експрес-моделей є не просто варіативність властивостей компонент досліджуваних композицій, а їхня невизначеність в силу їх відсутності у розпорядженні проєктувальника (а саме – на поточний момент відсутній (ще не створений) той чи інший матеріал чи компонент із бажаними властивостями). Враховуючи цю обставину, можна застосувати певні «заглушки», замінюючи реальні властивості існуючих компонент на «віртуальні».

Таким чином, у підсумку пропонується для побудови шуканих експрес-моделей використати критерій

$$\|u_E - u_N^{\sim}\| \rightarrow \min, \|u_E - u_N^{\sim}\| \leq \varepsilon, \quad (5)$$

де u_E – деяке поле змінних стану, визначених на досліджуваному об'єкті,

$\|\cdot\|$ – певна міра невідповідності у парі (5), а ε – допустимий рівень похибки (міра невідповідності).

У (5) фігурують поля u_E , які було би варто (у ідеалі) отримати із експериментів на реальних об'єктах. Якщо (як правило) такі об'єкти або їхні аналоги – відсутні, можливо перейти до макетів або до представницьких фрагментів.

Ще один із базових варіантів, який відповідає множині описаних вище вимог, – використання для порівняння у (5) u_E , отриманих із застосуванням на представницьких тестових зразках моделі (1), а також її дискретного варіанта.

Приклади досліджень напружено-деформованого стану тестових зразків. Як ілюстративні залучені такі приклади матеріалів:

I – гомогенний матеріал – сталь;

II – композиція «сталь – кераміка – сталь»;

III – композиція «зовнішня кераміка - сталевий лист»;

IV – композиція «сталевий лист - внутрішній протиуламковий підбій».

Види розрахунків:

α – аналіз напружено-деформованого стану при дії розподіленого тиску;

β – аналіз власних частот і форм коливань;

γ – аналіз втрати стійкості при дії стискових навантажень.

Розрахункові та експериментальні дослідження процесів і станів у тестових конструкціях фрагментів, макетів та натурних зразків корпусів легкоброньованих машин. Із метою ілюстрації розробленого підходу було здійснено низку розрахунків та експериментальних фіксацій процесів і станів у тестових конструкціях фрагментів, макетів та натурних зразків корпусів легкоброньованих машин.

Напружено-деформований стан та власні коливання і стійкість фрагмента панелі бронекорпусу легкоброньованої машини. Досліджувались зразки із гомогенного та композитних матеріалів.

Що стосується основного матеріалу досліджуваної сендвіч-панелі, то за нього прийнято сталь із модулем пружності $E = 210$ ГПа, коефіцієнтом Пуассона $\nu = 0,3$. За тестові зразки взята пластина (рис. 1).

Що стосується керамічних елементів, то вони мають самі різноманітні склад, структуру та властивості. Так, для захисту від кінетичних елементів як керамічна вставка використовується карбід кремнію (SiC), який є задовільним балансом за характеристикою ціна-якість. Ця

кераміка використовується масово у армійських плитах, зокрема, NATO.

Модуль пружності (E): $\approx 390\text{--}450$ ГПа (залежить від пористості, мікроструктури та шляхів спікання); коефіцієнт Пуассона (ν): $\approx 0,17\text{--}0,22$; густина (ρ): $\approx 3,15\text{--}3,22$ г/см³ ($\approx 3150\text{--}3220$ кг/м³). У поточному розрахунку використані характеристики, наведені на рис. 2.

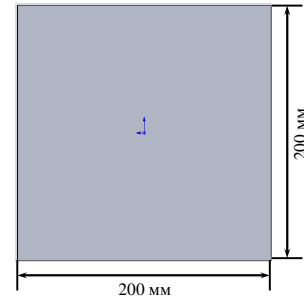


Рисунок 1 – Геометрія та розміри (мм) плити у плані

Якщо звернути увагу на матеріали для протиуламкового підбою для захисту внутрішньоброньового (заброньового) простору бойових машин, то серед великого їх розмаїття традиційно переважають «кевлари» та подібні для них матеріали. Характеристики кевлару наведені на рис. 3.

Досліджуються власні частоти та власні форми коливань (у т.ч. – ортогональні) жорстко закріпленої по контуру пластини, а також повний прогин та еквівалентні напруження від тиску в 1 МПа, розподіленого на площі 0,2х0,2 м.

3	SiC			
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	3200	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's...		
6	Young's Modulus	420	GPa	
7	Poisson's Ratio	0,2		
8	Bulk Modulus	2,3333E+11	Pa	
9	Shear Modulus	1,75E+11	Pa	

Рисунок 2 – Властивості шару кераміки із карбиду кремнію, прийняті для розрахунку

Kevlar			
Material Field Variables	Table		
Density	1440	kg m ⁻³	
Isotropic Elasticity			
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio		
Young's Modulus	100	GPa	
Poisson's Ratio	0,35		
Bulk Modulus	1,1111E+11	Pa	
Shear Modulus	3,7037E+10	Pa	

Рисунок 3 – Властивості кевлару, прийняті для розрахунку

Досліджуються такі типи зразків: Модель I – сталевий лист (рис. 4), Модель II – складена пластина

«сталь-кераміка-сталь» (рис. 5), Модель III – складена плита «кераміка-кераміка-сталь» (рис. 6), Модель IV – складена плита «кевлар-сталь» (рис. 7).

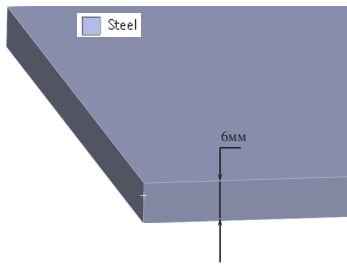


Рисунок 4 – Матеріал та товщина (мм)

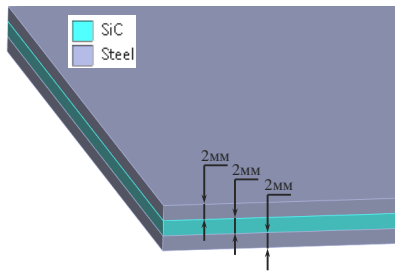


Рисунок 5 – Матеріали та товщини (мм) шарів сендвіч-панелі «сталь-кераміка-сталь»

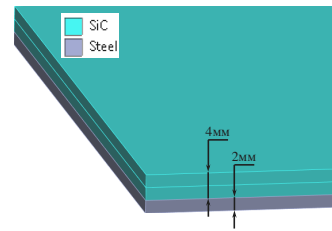


Рисунок 6 – Матеріали та товщини (мм) шарів сендвіч-панелі «кераміка-кераміка-сталь»

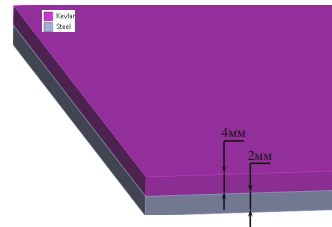
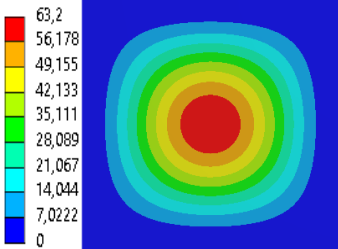
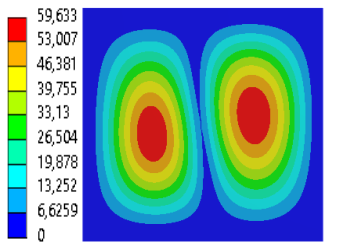
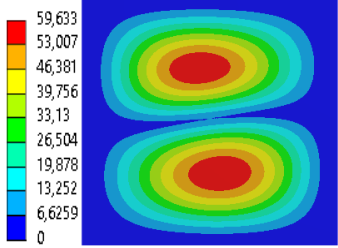
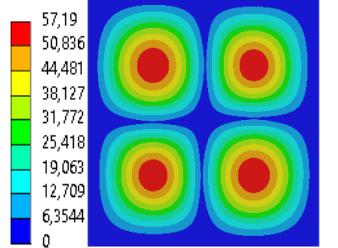
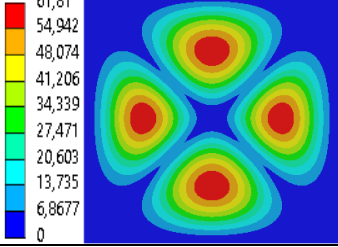
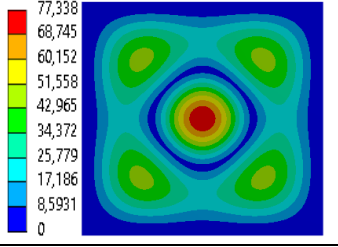
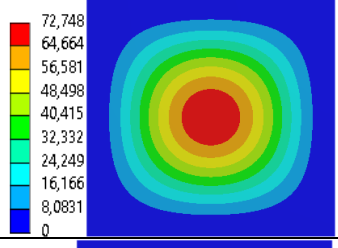
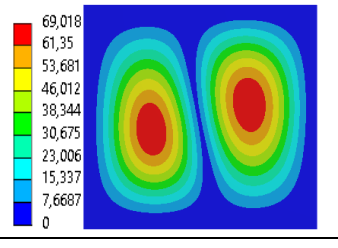
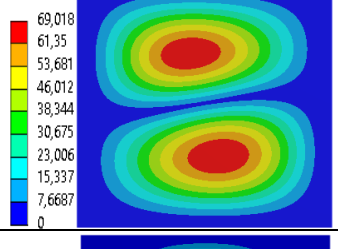
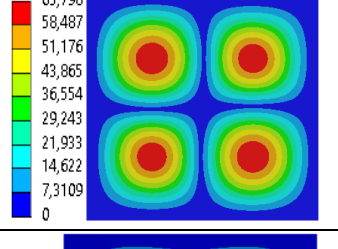
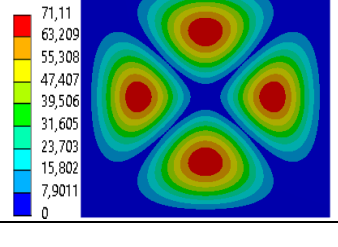
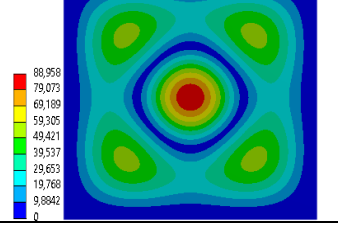
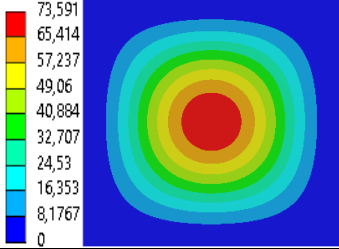
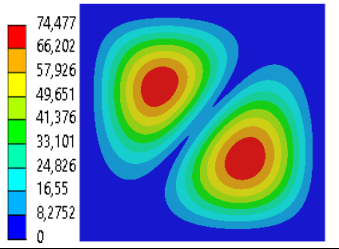


Рисунок 7 – Матеріали та товщини (мм) шарів сендвіч-панелі «кевлар-сталь»

Результати дослідження власних частот (ВЧК) та власних форм коливань (ВФК) та розподіли компонент напружено-деформованого стану при дії тиску 1 МПа для моделей I-IV наведені у табл. 1, 2.

Таблиця 1 – Власні частоти і форми коливань панелі при дії тиску 1 МПа для моделей I-IV

№ ВФК	Власні форми коливань	ВЧК, Гц	№ ВФК	Власні форми коливань	ВЧК, Гц
модель I					
1		1300,9	2		2632,8
3		2632,8	4		3854
5		4668,8	6		4693,8

№ ВФК	Власні форми коливань	ВЧК, Гц	№ ВФК	Власні форми коливань	ВЧК, Гц
модель II					
1	 63,2 56,178 49,155 42,133 35,111 28,089 21,067 14,044 7,0222 0	1482,6	2	 59,633 53,007 46,381 39,755 33,13 26,504 19,878 13,252 6,6259 0	3006
3	 59,633 53,007 46,381 39,756 33,13 26,504 19,878 13,252 6,6259 0	3006	4	 57,19 50,836 44,481 38,127 31,772 25,418 19,063 12,709 6,3544 0	4407,6
5	 61,81 54,942 48,074 41,206 34,339 27,471 20,603 13,735 6,8677 0	5344,1	6	 77,338 68,745 60,152 51,558 42,965 34,372 25,779 17,186 8,5931 0	5371,8
модель III					
1	 72,748 64,664 56,581 48,498 40,415 32,332 24,249 16,166 8,0831 0	2000,4	2	 69,018 61,35 53,681 46,012 38,344 30,675 23,006 15,337 7,6687 0	4053,6
3	 69,018 61,35 53,681 46,012 38,344 30,675 23,006 15,337 7,6687 0	4053,7	4	 65,798 58,487 51,176 43,865 36,554 29,243 21,933 14,622 7,3109 0	5940,9
5	 71,11 63,209 55,308 47,407 39,506 31,605 23,703 15,802 7,9011 0	7201,2	6	 88,958 79,073 69,189 59,305 49,421 39,537 29,653 19,768 9,8842 0	7238,8
модель IV					
1	 73,591 65,414 57,237 49,06 40,884 32,707 24,53 16,353 8,1767 0	1417,9	2	 74,477 66,202 57,926 49,651 41,376 33,101 24,826 16,55 8,2752 0	2869,4

Закінчення табл. 1

№ ВФК	Власні форми коливань	ВЧК, Гц	№ ВФК	Власні форми коливань	ВЧК, Гц
модель IV					
3		2869,4	4		4200,2
5		5088,2	6		5115,5

Таблиця 2 – Розподіли компонент напружено-деформованого стану при дії тиску 1 МПа для моделей I-IV

№ моделі	Повні переміщення (мм)	Еквівалентні напруження за Мізесом (МПа)
I		
II		
III		
IV		

Аналіз результатів досліджень свідчить, що очікувано власні форми коливань для різних моделей схожі. Разом із тим власні частоти

коливань мають суттєвий розкид (для прикладу, на рис. 8 – перші власні частоти коливань).

Аналогічно, розподіл компонент напружено-

деформованого стану тестового зразка сендвіч-панелей для різних варіантів моделей має схожий характер. Проте рівні повних переміщень (прогинів) та еквівалентних напружень (за Мізесом) мають суттєвий розкид за варіантами моделей (рис. 9, 10).

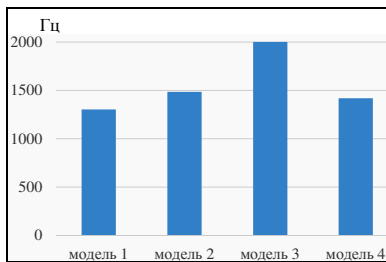


Рисунок 8 – Перші власні частоти коливань (Гц) для різних моделей

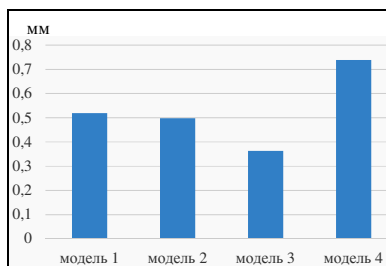


Рисунок 9 – Максимальні повні переміщення (мм) для різних моделей

Стійкість панелей до дії стискових сил. Досліджується втрата стійкості панелей, аналогічних зображеним на рис. 4–7. Крайові умови: дві суміжні

сторони – жорстко защемлені; дві інші – вільні. Тиск на торцеві краї – 1кН (рис. 11).

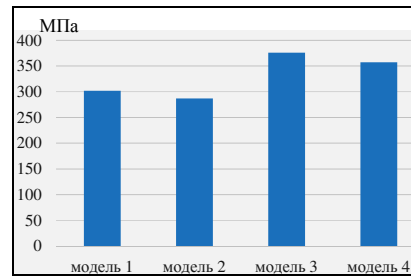


Рисунок 10 – Максимальні еквівалентні напруження (МПа) для різних моделей

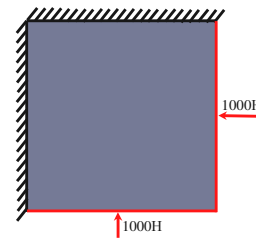
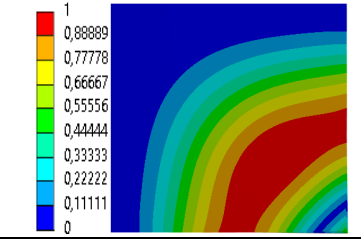
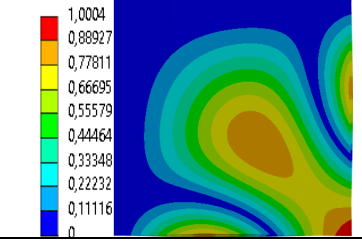
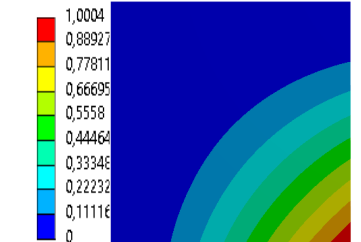
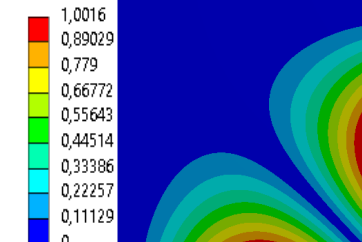
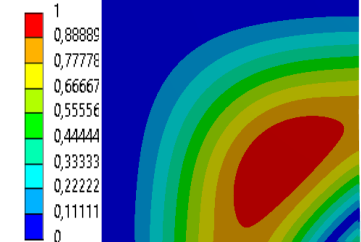
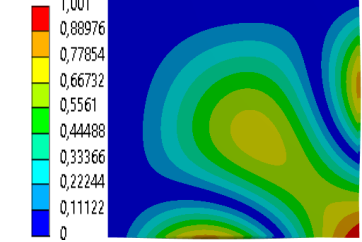
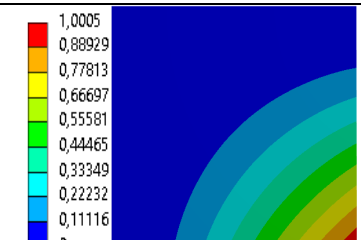
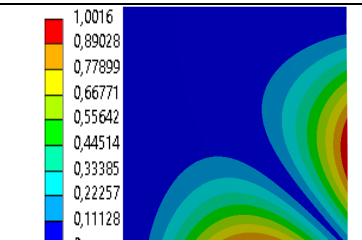
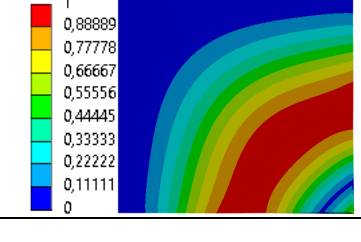
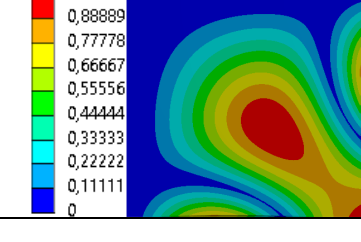


Рисунок 11 – Схема закріплення та навантаження тестової пластини

Результати досліджень форми втрати стійкості для наступних моделей: Модель 1 – сталеві плита, Модель II – складена плита сталь – кераміка – сталь, Модель III – складена плита кераміка – кераміка – сталь, Модель IV – складена плита кевлар – сталь, – у табл. 3.

Таблиця 3 – Форми втрати стійкості (ФВС) пластини та коефіцієнти запасу λ для моделей I-IV

№ ФВС	Форма втрати стійкості	λ	№ ФВС	Форма втрати стійкості	λ
Модель I					
1		111,8	2		265,8
3		568,0	4		736,3
Модель II					
1		117	2		279,3

№ ФВС	Форма втрати стійкості	λ	№ ФВС	Форма втрати стійкості	λ
Модель II					
3		595,5	4		777,3
Модель III					
1		165,66	2		401,67
3		827,51	4		1099,9
Модель IV					
1		76,9	2		180,6
3		394,0	4		507,0

Форми втрати стійкості – аналогічні за характером для досліджених варіантів пластин. Проте розкид запасів стійкості – двократний.

Напружено-деформований стан та власні коливання тестового бронекорпусу машини типу МТ-ЛБ. Зважаючи на зазначені вище особливості, для визначення тенденцій, характерних для легкоброньованих машин, на перших проектних етапах можливо використовувати у початковому наближенні деякі «еквівалентні» моделі із гомогенних матеріалів (рис. 12).

Результати дослідження стійкості тестового бронекорпусу для наступних варіантів моделей: Корпус МТ-ЛБ зроблений зі сталі (модель I) та Корпус МТ-ЛБ, зроблений із композита (модель

II), наведено у табл. 4.

На рис. 13 – картини розподілу компонент напружено-деформованого стану тестового корпусу машини типу МТ-ЛБ від тиску 0,01 МПа.

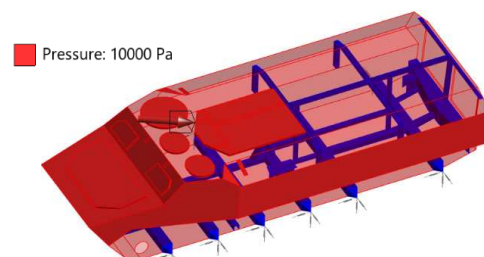
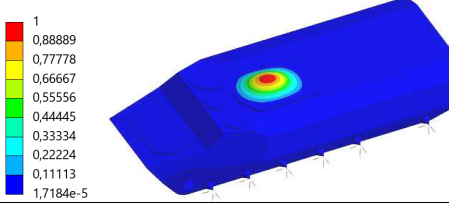
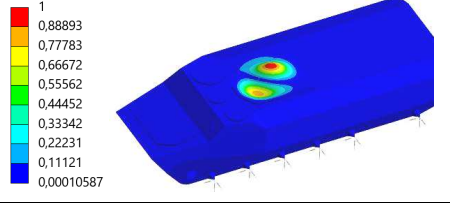
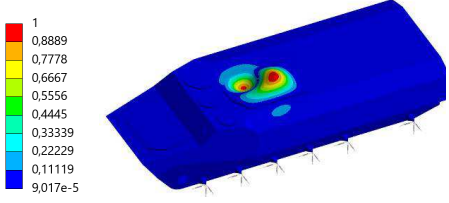
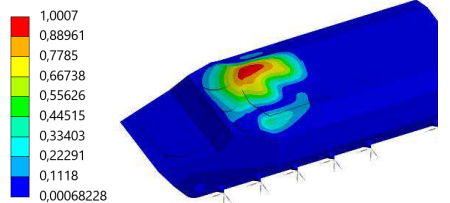
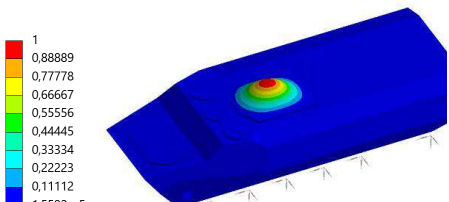
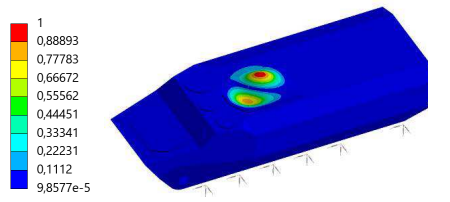
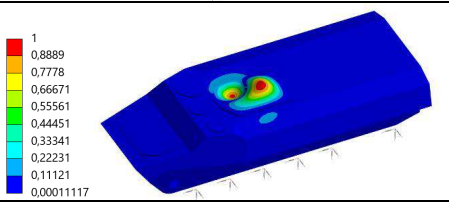
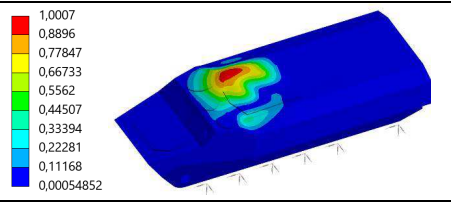
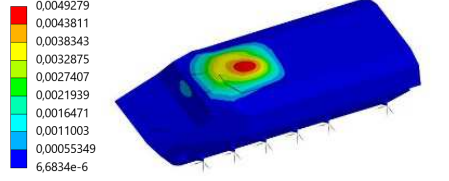
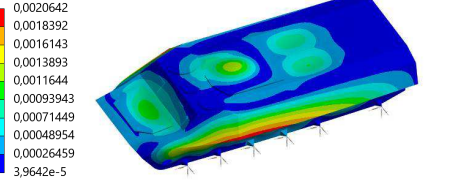
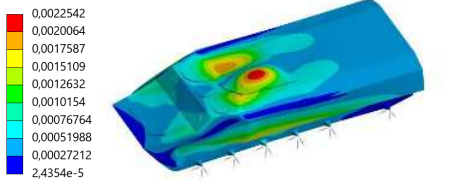
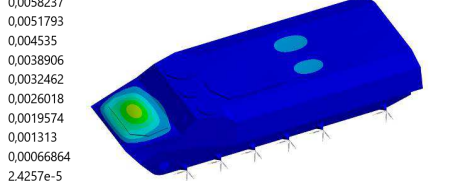
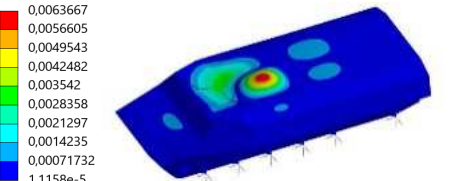
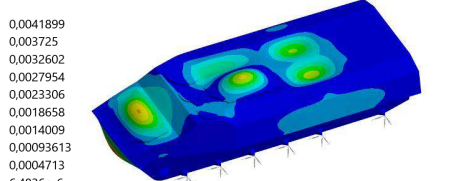
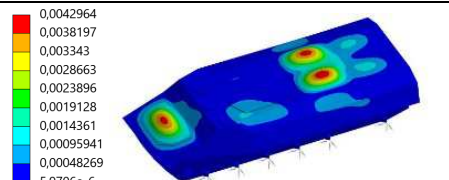
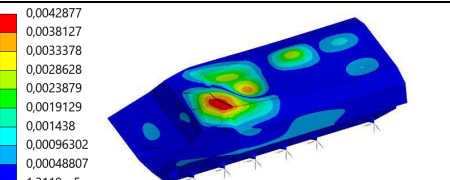


Рисунок 12 – Навантаження тестового корпусу МТ-ЛБ зовнішнім тиском

Таблиця 4 – Форми втрати стійкості тестового корпусу МТ-ЛБ та коефіцієнт запасу стійкості λ

№ ФВС	Форма втрати стійкості	λ	№ ФВС	Форма втрати стійкості	λ
Модель I					
1		3,33	2		5,26
3		6,42	4		7,72
Модель II					
1		3,17	2		5,0
3		6,1	4		7,33

Таблиця 5 – Власні форми і частоти коливань та розподіл компонент напружено-деформованого стану тестового корпусу машини типу МТ-ЛБ

№ ВФК	Власні форми коливань	ВЧК, Гц	№ ВФК	Власні форми коливань	ВЧК, Гц
7		24,82	8		32,94
9		34,61	10		37,47
11		38,83	12		40,8
13		44,25	14		46,07

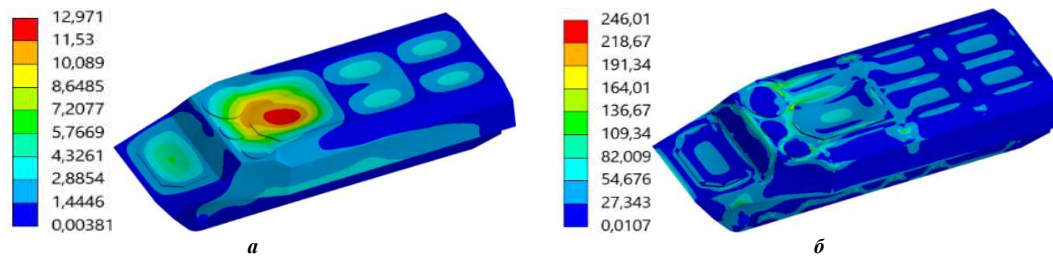


Рисунок 13 – Розподіл компонент напружено-деформованого стану тестового корпусу машини типу МТ-ЛБ від тиску 0,01 МПа: *а* – повні переміщення (мм), *б* – еквівалентні напруження (МПа)

Також для ілюстрації у табл. 5 наведені результати розрахунків власних частот і форм коливань тестового корпусу машин типу МТ-ЛБ, виготовленого із певних «еквівалентних» за властивостями матеріалів. Усі елементи корпусів – однакові за властивостями та не відповідають реальним конструкціям. Проте деяке уявлення про міцність, жорсткість та динамічну збудливість результати таких проектних досліджень надають. Цим такі спрощені моделі і цінні на початкових етапах розробки бронекорпусів, зважаючи на величезну кількість варіантів конструкцій, які необхідно дослідити. Крім того, такі моделі мають властивість «спадковості»: після побудови більш адекватних і точних скінченно-елементних моделей («композитних», «Shell-Solid» тощо) уся топологічна і геометрична та фізична інформація передається для більш детального аналізу на завершальних етапах проектних досліджень.

Окрім перелічених, були здійснені також чисельні та експериментальні дослідження напружено-деформованого стану, елементів, макетів та натурних зразків бронекорпусів цілої низки легкоброньованих машин. Вони засвідчили задовільну узгодженість результатів чисельних та експериментальних досліджень.

Аналіз результатів та висновки. Розроблений та описаний у роботі підхід до побудови експрес-моделей напружено-деформованого стану, власних коливань та стійкості бронекорпусів легкоброньованих машин дає підстави відзначити такі особливості та висновки.

1. Розроблений підхід декларує створені експрес-моделі напружено-деформованого стану бронекорпусів легкоброньованих машин із нетрадиційних, поверхнево зміцнених матеріалів та композицій не тільки шляхом проходження декількох етапів у ланцюгу моделей від більш складної до менш складної, проте достатньо точної, але й додаванням до цього алгоритму етапу «зворотного» зв'язку, який певним чином «узгоджує» (балансує) вимоги точності результатів досліджень та помірності вимог до обчислювальних ресурсів. Тим самим досягається більша міра достовірності результатів досліджень напружено-деформованого стану бронекорпусів легкоброньованих машин із нетрадиційних, поверхнево зміцнених матеріалів та композицій. Відповідно, відкривається перспектива обґрунтування технічних рішень бронекорпусів

легкоброньованих машин, які задовольняють за тактико-технічними характеристиками вимогам сучасності.

2. У експрес-моделі, що будуються, а також у всі моделі із повного їх ланцюга інтегруються узагальнені параметри, шляхом варіювання котрих можна досягати адекватності між початковою фізичною моделлю реального об'єкта, з одного боку, та чисельною експрес-моделлю, – з іншого.

3. Важливою особливістю побудованих експрес-моделей напружено-деформованого стану бронекорпусів легкоброньованих машин із нетрадиційних, поверхнево зміцнених матеріалів та композицій є можливість формування спеціалізованих баз даних результатів досліджень. Ці бази слугують основою формування прогресивних технічних рішень бронекорпусів легкоброньованих машин за критеріями та вимогами не тільки поточними, але й – на перспективу. Враховуючи тренди на різку зміну умов ведення бойових дій, засобів ураження та режимів бойового застосування, саме такі моделі адаптовані до постійного удосконалення технічних рішень бронекорпусів, а також – формування вимог до їхніх компонентів.

4. Приклади дослідження напружено-деформованого стану зразків композицій бронепанелей підтвердила працездатність розробленого підходу до побудови їх відповідних експрес-моделей.

5. Приклади дослідження тестових моделей бронекорпусів та їх макетів продемонстрували придатність до аналізу напружено-деформованого стану, власних коливань та стійкості бронекорпусів легкоброньованих машин із нетрадиційних, поверхнево зміцнених матеріалів та композицій.

Таким чином, розроблено удосконалений підхід до здійснення проектних досліджень, який може бути застосованим при розробці бронекорпусів легкоброньованих машин із підвищеними тактико-технічними характеристиками. Він не підміняє повномасштабних досліджень із залученням повноцінних моделей, а є тільки експрес-варіантом, який має певну доцільність застосування на перших етапах проектних досліджень бронекорпусів легкоброньованих машин. Якраз на цих етапах закладаються структурні рішення на основі трендів, які можуть

визначатися із застосуванням запропонованих та описаних експрес-моделей.

Список літератури

- Грабовський А.В., Ткачук М.М., Васильев А.Ю., Ткачук М.А., Коба А. М., Карпов В. О., Троценко В.В., Богач А.С., Набоков А.В., Соловей В.Ю., Рікунов О.М. Забезпечення підвищених тактико-технічних характеристик легкоброньованих машин на основі визначення динамічної міцності бронекорпусів із гомогенних та композиційних матеріалів. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. – 2025. №1. – С. 27-46. doi: 10.20998/2079-0775.2025.1.04
- Leonid Davydovskiy, Serhii Bisyk, Iliyan Hutov, Iliyan Lilov, Alexander Kuprinenko, Oleg Yalynyskiy. 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*. 2020. YEAR V. ISSUE 2. – P. 45-47. ISSN PRINT 2367-8399
- Davydovskiy L., Bisyk S. Formation of requirements for anti-mine energy-absorbing seats of armored combat vehicles. *Collection of Sciences. Proceedings of the Central Research Institute of Weapons and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine*, Kyiv. 2016.– Iss. 2 (61). – P. 18–30.
- Bisyk S.P., Davydovskiy L.S., Chepkov I.B., et al. Theoretical evaluation of mine resistance of multipurpose tactical vehicle Kozak2. *Weapons and military equipment*. 2016. – №1 (9). –P. 26-31.
- Jones N. Several phenomena in structural impact and structural crashworthiness. *Europ Mechanics - 5th EUROMECH Solid Mechanics Conference*. – 2003. – № 22(5). –P. 693-707.
- White M.D., Jones N. Experimental quasi-static axial crushing of top-hat and double-hat thin-walled sections. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1999. – 41(2), 179-208.
- Energy absorption capabilities of complex thin walled structures* / Електронний ресурс [https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/257/1/012027/pdf]
- Shahravi S., Rezvani M.J., Jahan A. Multi-response Optimization of Grooved Circular Tubes Filled with Polyurethane Foam as Energy Absorber. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*. 2019. – 12 (1). – P. 133-149.
- Davydovskiy L.S., Bisyk S.P., Chepkov I.B. et al. Alternatives of Energy Absorption Element Design Parameters for an Armored Combat Vehicle Seat Under Explosive Loading. *Strength Mater*. 2020. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00140-7>
- Davydovskiy L., Bisyk S., Korbach V. Investigation of the energy-absorbing element of the mine seat of a crew of a combat armored vehicle. *Weapons and military equipment*. 2017. – vol. 1 (13). – P. 5-12.
- Chepkov I.B., Lapitskiy S.V., Kuchinskiy A.V., Kuchinska O.B., Zirka M.V., Zvershkhovskiy I.V., Hurnovich A.V., Dokuchaev O.V., Andriyenko A.M. & Oliarnik B.O. Experimental Studies on the Effect of Destructive Reagents on Metal Structural Elements. *Powder metallurgy industry and managerial economics*. 2024. – Volume 63. – P. 117–122. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11106-024-00443-3>
- Чепков І. Б. Роль та місце матеріалознавства у створенні новітнього озброєння та військової техніки Збройних Сил України. *Вісник Національної академії наук України*. 2023. – № 6. – С. 73-83. DOI: 10.15407/vsn2023.06.073
- Chepkov I. B., Hurnovych A. V., Lapyts'kiy S. V., Oliarnyk B. O., Trofymenko V. H. & Maistrenko O. A. Method of Conversion for the Ballistic Coefficient of Bullets. *Strength of Materials*. 2020. Volume 52, pages 419–422. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00193-8>
- Леднянський О. Ф., Бісик С. П., Санін А. Ф., Пошивалов В. П. Визначення придатності пористих пресовок з алюмінію та алюмінієвих сплавів для використання в якості енергопоглинаючих елементів. *Технічна механіка*. 2020. № 4. С. 109-116. DOI: <https://doi.org/10.15407/itm2020.04.109>
- Бісик С. П., Голуб В. А., Ларін О. Ю., Чеченкова О. Л. Числове моделювання вибухового навантаження модульних стільникових конструкцій бойових броньованих машин. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Харків. 2013. № 23 (996). С.26–33.
- Бісик С. П., Чепков І. Б., Голуб В. А., Корбач В. Г. Оцінка впливу способу кріплення протимінного екрана на протимінну стійкість бойових броньованих машин. *Системи озброєння і військова техніка*. Харків. 2013. № 1 (33). С. 8–12.
- Грубель М. Г., Крайник Л. В., Хоменко В. П. Дослідження конструктивних особливостей та тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин типу MRAP. *Системи озброєння і військова техніка*. Харків. 2018. № 1 (53). С. 7–19.
- Anatoliy L. Maystrenko, Volodymyr I. Kushch, Evgeniy A. Pashchenko, Vitaliy G. Kulich, Oleksiy V. neshpor, Sergiy P. Bisyk. Ceramic Armour for Armoured Vehicles Against Large-Calibre Bullets. *Problemy Mechatroniki: uzbrojenie, lotnictvo, inzhinieria bezpechizhstva*. 2020. Vol. 11, Nr 1 (39). Strony 9-16. DOI: 10.5604/01.3001.0014.0279
- Сливинський О.А., Бісик С. П., Чепков І.Б., Васцьківський М.І., Чернозубенко О.В. Проблеми виготовлення зварних бронекорпусів вітчизняних бойових броньованих машин. *Озброєння та військова техніка*. 2017. №4. С. 29-38. https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=ru&user=WqIer8gAAAAJ&scstart=20&pagesize=80&sort_by=pubdate&citation_for_view=WqIer8gAAAAJ:hFO9nPyWt4C
- Кривенко О. П., Лізунов П. П., Ворона Ю. В., Калашніков О. Б. Моделювання термопружних властивостей композитного матеріалу в задачах стійкості багатшарових оболонок. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2023. № 54. С. 77–89. [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2023.54.77-89](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.54.77-89)
- Углеродные волокна и углекомпози́ты*: пер. с англ. / под ред. Э.Фитцера. Москва: Мир. 1988. 336 с.
- Кучер М. К., Заразовський М. М. Оцінка мікромеханічних моделей прогнозування ефективних констант пружності волокнистих композитів. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія *Машинобудування*. 2010. № 58. С.24–29.
- Баженов В. А., Кривенко О. П., Соловей М. О. *Нелінійне деформування та стійкість пружних оболонок неоднорідної структури*. Київ: ЗАТ «Віпол», 2010. 316 с.
- Кривенко О. П., Лізунов П. П., Ворона Ю. В., Калашніков О. Б. Використання моментної схеми скінчених елементів при дослідженні тонких пружних оболонок неоднорідної структури. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2023. № 53. С. 52–62. [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2023.53.52-62](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.53.52-62).
- Баженов В. А., Кривенко О. П. *Стійкість і коливання пружних неоднорідних оболонок при термосилово́му навантаженню*. Київ: Каравела. 2020. 187 с.
- Krivenko O. P., Lizunov P. P., Vorona Yu. V., Kalashnikov O. B. A Method for Analysis of Nonlinear Deformation, Buckling, and Vibrations of Thin Elastic Shells of an Inhomogeneous Structure. *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles*. Kyiv: KNUBA. 2023. Issue 110. P. 131–149.
- Bazhenov V., Krivenko O. Buckling and Natural Vibrations of Thin Elastic Inhomogeneous Shells. *Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing*, 2018. 97 p.
- Киркач О.Б., Конохов В.І. Напружено-деформований стан та міцність шаруватих композитних пластиків із навантаженими отворами. Матеріали XXIV міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MicroCAD-2016). Харків. НТУ «ХПІ». 2016.
- Смірнова Я.О., Гурія І.М. Мікроструктура та механічні властивості шаруватого литого композиту ВТ-6/АІ. ISSN 2077-1304. *Met. lit'e Ukr*. 2022. vol. 30. № 1 (328). P. 84-90 <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.01.084>
- Du Y., Fan G., Yu T., Hansen N., Geng L., Huang X. Laminated Ti-Al composites: processing, structure and strength. *Materials Science & Engineering A*. 2016. Vol. 673. P. 572–580. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.108>
- Padnuru Sripathy A., Gupta M. Insight Into Layered Metal

- Matrix Composites. *Encyclopedia of Materials: Composites*. 2021. Vol. 1. P. 121–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819724-0.00021-5>
32. Smirnova Y., Huriia I., Loboda P. Liquid phase fabrication technology of layered Ti/Al composite. U.P.B. *Scientific bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*. 2021. Vol. 83. Iss. 4. P. 273–282. URL: https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rezb3b_447954.pdf
 33. Сметанкіна Н. В., Місюра С.Ю., Місюра С.Ю. Аналіз деформування шаруватих конструкцій аерокосмічної техніки при багатофакторному навантаженні. *Математичні проблеми технічної механіки – 2024 : матеріали міжнародної наукової конференції, 18-19, 22 квітня 2024 р. : тези допов.* Дніпро. 2024. 000С. 43–45. <http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/32847>
 34. Sierikova O., Strelnikova E., Gnito V., Degtyarev K. Boundary calculation models for elastic properties clarification of three-dimensional nanocomposites based on the combination of finite and boundary element methods. In: 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2021. P. 351–356.
 35. Smetankina N., Ugrimov S., Kravchenko I., Ivchenko D. Simulating the process of a bird striking a rigid target. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2020. P. 711–721. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_71
 36. Шупиков А.Н., Бузько Я.П., Сметанкіна Н.В., Угримов С.В. *Нестационарные колебания многослойных пластин и оболочек и их оптимизация*. Харьков. ХНЭУ, 2004. 252с.
 37. *Керамічні бронеплити – технологічна еволюція захисту*. Електронний ресурс. <https://balistika.ua/articles/keramichni-broneplyty-tekhnologichna-evolyutsiya-zakhystu>. 01.07.2024
 38. Бурлаєнко В. М., Львов Г.І., Дімітрова–Бурлаєнко С. Д. Дослідження стійкості метал-матричних композитних балок змінного поперечного перерізу з аксіальноградієнтним армуванням. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР*. 2025. №2. С. 26–34. DOI:<https://doi.org/10.20998/2079-0775.2025.2.04>
 39. Burlayenko V.N., Kouhia R, Dimitrova S.D. Free vibration analysis of curvilinearly tapered axially functionally graded material beams. *Applied Sciences*. 2024. <https://doi.org/10.3390/app14156446><https://doi.org/10.3390/app14156446>
 40. Burlayenko V.N., Sadowski T., Altenbach H. Efficient free vibration analysis of FGM sandwich flat panels with conventional shell elements. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2022. <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1909191>
 41. Burlayenko V.N. A continuum shell element in layerwise models for free vibration analysis of FGM sandwich panels. Springer. 2021. Volume 33. P. 1385–1407. https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=uk&user=CqTeRTIAAAAJ&scstart=20&pagesize=80&sortby=pubdate&citation_for_view=CqTeRTIAAAAJ.J_g51zvAfSwC
 42. Burlayenko, V.N., Altenbach, H., Sadowski, T. An evaluation of displacement-based finite element models used for free vibration analysis of homogeneous and composite plates. *J. Sound Vib.* 358, 152–175 (2015)
 43. Hajlaoui, A., Chebbi, E., Wali, M., Dammak, F. Geometrically nonlinear analysis of FGM shells using solid shell element with parabolic shear strain distribution. *Int. J. Mech. Mater. Des.* 2020. 16. 351–366. DOI: 10.1007/s10999-019-09465-x
 44. Altenbach, H., Altenbach, J., Kissing, W. *Mechanics of Composite Structural Elements*, 2nd edn. Springer, Singapore (2018).
 45. Burlayenko, V.N., Altenbach H., Sadowski, T. Dynamic fracture analysis of sandwich composites with face sheet/core debond by the finite element method. In: Altenbach, H., et al. (eds). *Dynamical Processes in Generalized Continua and Structures. Advanced Structured Materials*. 2019. vol. 103. P. 163–194. Springer, Cham.
 46. Burlayenko V. N., Kouhia R., Dimitrova S. D. Free vibration analysis of curvilinearly tapered axially functionally graded material beams. *Applied Sciences*. 2024. vol. 14. N 15. 6446. <https://doi.org/10.3390/app14156446>
 47. Burlayenko V.N., Sadowski T., Marsavina L. Free vibration analysis of functionally graded carbon nanotube reinforced beams with variable cross-section using the differential transform method. *Meccanica*. 2025, in press.
 48. Mykola Tkachuk, Anton Tkachuk. Large deformation of cable networks with fiber sliding as a second-order cone programming. *International Journal of Solids and Structures*. 2024. Vol. 298. P. 112848. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2024.112848>
 49. Jubera R., Ridruejo A., González C., LLorca J. Mechanical behavior and deformation micromechanisms of polypropylene nonwoven fabrics as a function of temperature and strain rate. *Mech. Mater.* 2014. 74. P. 14–25. DOI 10.1016/j.mechmat.2014.03.007
 50. Kanno Y. *Nonsmooth Mechanics and Convex Optimization*. 9781420094244, CRC Press (2011). URL <https://books.google.se/books?id=52XMBQAAQBAJ>.
 51. Ridruejo A., Jubera R., González C., LLorca J. Inverse notch sensitivity: Cracks can make nonwoven fabrics stronger. *J. Mech. Phys. Solids*. 2015. 77. P. 61–69. DOI: 10.1016/j.jmps.2015.01.004
 52. Tkachuk M. Complementary energy principle for cable networks in terms of force vector variable. *Bull. Natl. Tech. Univ. KhPI Ser. Eng. CAD* (1). 2022. P. 85–90. doi: 10.20998/2079-0775.2022.1.09
 53. Tkachuk M., Linder C. The maximal advance path constraint for the homogenization of materials with random network microstructure. *Phil. Mag.* 2012. 92 (22). P. 2779–2808. DOI: 10.1080/14786435.2012.675090
 54. Kanno Y., Ohsaki M. Contact analysis of cable networks by using second-order cone programming. *SIAM J. Sci. Comput.* 2006. 27 (6). P. 2032–2052. <https://doi.org/10.1137/S106482750343194>
 55. Negi V., Picu R. C. Mechanical behavior of cross-linked random fiber networks with inter-fiber adhesion. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2019. 122. P. 418–434. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2019.11.003>
 56. Deoekar S., Picu R. C. Strength of stochastic fibrous materials under multiaxial loading. *Soft Matter*. 2021. 17(3). P. 704–714. <https://doi.org/10.1039/D0SM01713B>
 57. Deoekar S., Yan Z., Picu R. C. Random Fiber Networks With Superior Properties Through Network Topology Control. *Journal of Applied Mechanics*. 2019. 86(8). P. 081010. <https://doi.org/10.1115/1.4043828>
 58. Chen, N., Silberstein, M. N. A micromechanics-based damage model for non-woven fiber networks. *International Journal of Solid and Structures*. 2019. 160. P. 18–31. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.10.009>
 59. Tkachuk M.M. *Elastic Homogenization of Materials with Composite Network Structures*. Published: 10 June 2022 Volume 263. P. 104–119, (2022). DOI:10.1007/s10958-022-05910-z
 60. Tkachuk M. M. Method of elastic homogenization of bimodal networks. *Visnyk Nats. Tekh. Univ. "KhPI," Ser. Mashynoznavstvo SAPR*. 2019. № 7. P. 107–115. <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2019.7.17>.
 61. Васидзу К. *Вариационные методы в теории упругости и пластичности*. М., Мир, 1987. 542с.
 62. Гольденвейзер А. Л. *Теория упругих тонких оболочек*. М.: Наука, 1976. 512 с.
 63. Zienkiewicz O. C., R. L. Taylor, Govindjee S. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 87th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. 2024. 632 p.

References (transliterated)

1. Hrabovskiy A.V., Tkachuk M.M., Vasyliov A.Yu., Tkachuk M.A., Koba A. M., Karpov V. O., Trotsenko V.V., Bohach A.S., Nabokov A.V., Solovei V.Yu., Rikunov O.M. (2025). Zabezpechennia pidvyshchennykh taktiko-tekhnichnykh kharakterystyk lehkobronovanykh mashyn na osnovi vyznachennia dynamichnoi mitsnosti bronekorpusiv iz homohennykh ta kompozytsiinykh materialiv [Ensuring increased tactical and technical characteristics of lightly armored vehicles based on determining the dynamic strength of armored hulls made of homogeneous and composite materials]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*, no.1, pp. 27–46. doi: 10.20998/2079-0775.2025.1.04

2. Leonid Davydovskiy, Serhii Bisyk, Iliyan Hutov, Iliyan Lilov, Alexander Kuprinenko, Oleg Yalnytyskiy. 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*, 2020, YEAR V. ISSUE 2, pp. 45-47. ISSN PRINT 2367-8399
3. Davydovskiy L., Bisyk S. Formation of requirements for anti-mine energy-absorbing seats of armored combat vehicles. *Collection of Sciences. Proceedings of the Central Research Institute of Weapons and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine*, Kyiv, Iss. 2 (61), 2016, pp. 18–30.
4. Bisyk S.P., Davydovskiy L.S., Chepkov I.B., et al. Theoretical evaluation of mine resistance of multipurpose tactical vehicle. *Kozak2. Weapons and military equipment*, 2016, no.1 (9), 26-31.
5. Jones N. Several phenomena in structural impact and structural crashworthiness. *Europ Mechanics - 5th EUROMECH Solid Mechanics Conference*, 2003, no. 22(5), 693-707.
6. White M.D., Jones N. Experimental quasi-static axial crushing of top-hat and double-hat thin-walled sections. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1999, 41(2), 179-208.
7. Energy absorption capabilities of complex thin walled structures / Elektronnyi resurs [https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/257/1/012027/pdf]
8. Shahrafi S., Rezvani M.J., Jahan A. Multi-response Optimization of Grooved Circular Tubes Filled with Polyurethane Foam as Energy Absorber. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 2019, 12 (1), 133-149.
9. Davydovskiy L.S., Bisyk S.P., Chepkov I.B. et al. Alternatives of Energy Absorption Element Design Parameters for an Armored Combat Vehicle Seat Under Explosive Loading. *Strength Mater*, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00140-7>
10. Davydovskiy L., Bisyk S., Korbach V. Investigation of the energy-absorbing element of the mine seat of a crew of a combat armored vehicle. *Weapons and military equipment*, 2017, vol. 1 (13), 5-12.
11. Chepkov I.B., Lapitskiy S.V., Kuchinskiy A.V., Kuchinska O.B., Zirka M.V., Zvershkhovskiy I.V., Hurnovich A.V., Dokuchaev O.V., Andriyenko A.M. & Oliarnik B.O. Experimental Studies on the Effect of Destructive Reagents on Metal Structural Elements. *Powder metallurgy industry and managerial economics*, 2024, Volume 63, pp. 117–122. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11106-024-00443-3>
12. Chepkov I. B. Rol ta mistse materialoznavstva u stvorenni novitnoho ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki Zbroinykh Syl Ukrainy. [The role and place of materials science in the creation of modern weapons and military equipment of the Armed Forces of Ukraine]. *Visnik Nacionalnoi akademii nauk Ukraini*, 2023, no. 6, pp. 73-83. DOI: 10.15407/visn2023.06.073
13. Chepkov I. B., Hurnovych A. V., Lapyts'kyi S. V., Oliarnyk B. O., Trofymenko V. H. & Maistrenko O. A. Method of Conversion for the Ballistic Coefficient of Bullets. *Strength of Materials*, 2020, Volume 52, pp. 419–422. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00193-8>
14. Lednianskiy O. F., Bisyk S. P., Sanin A. F., Poshvalov V. P. Vyznachennia prydatnosti porystykh presovok z aluminiiu ta aluminiiemykh splaviv dlia vykorystannia v yakosti enerhopohlynaiuchykh elementiv [Determination of the suitability of porous aluminum and aluminum alloy extrusions for use as energy-absorbing elements]. *Tekhnichna mekhanika*, 2020, no. 4, pp. 109-116. DOI: <https://doi.org/10.15407/itm2020.04.109>
15. Bisyk S. P., Holub V. A., Larin O. Yu., Chechenkova O. L. Chyslove modelivannia vybukhovoho navantazhennia modulnykh stilykovykh konstrukttsii boiovykh bronovanykh mashyn [Numerical modeling of explosive loading of modular cellular structures of armored combat vehicles]. *Visnyk NTU «KhPI»*. Kharkiv. 2013, no. 23 (996), pp. 26–33.
16. Bisyk S. P., Chepkov I. B., Holub V. A., Korbach V. H. Otsinka vplyvu sposobu kriplennia protymynnoho ekrana na protymynnu stiikest boiovykh bronovanykh mashyn [Assessment of the impact of the method of attaching a mine screen on the mine resistance of armored combat vehicles]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*. Kharkiv, 2013, no. 1 (33), pp. 8–12.
17. Hrubel M. H., Krainyk L. V., Khomenko V. P. Doslidzhennia konstruktyvnykh osoblyvostei ta taktykotekhnichnykh kharakterystyk boiovykh bronovanykh mashyn typu MRAP [Research into the design features and tactical and technical characteristics of MRAP armored combat vehicles]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*. Kharkiv, 2018, no. 1 (53), pp. 7–19.
18. Anatoliy L. Maystrenko, Volodymyr I. Kushch, Evgeniy A. Pashchenko, Vitaliy G. Kulich, Olecksiy V. neshpor, Sergiy P. Bisyk. Ceramic Armour for Armoured Vehicles Against Large-Calibre Bullets. *Problemy Mechatroniki: uzbrojenie, lotnictvo, inzhynieria bezpieczenstva*. 2020. Vol. 11, Nr 1 (39). Strony 9-16. DOI: 10.5604/01.3001.0014.0279
19. Slyvynskiy O.A., Bisyk S. P., Chepkov I.B., Vaskivskiy M.I., Chernozubenko O.V. Problemy vyhotovlennia zvarnykh bronekorpusiv vitchyzniannykh boiovykh bronovanykh mashyn [Problems of manufacturing welded armored hulls of domestic armored combat vehicles]. *Ozbroiennia i viiskova tekhnika*, 2017, no.4, pp. 29-38. https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=ru&user=WqJr8gAAAAJ&scstart=20&pagesize=80&sortBy=pubdate&citation_for_view=WqJr8gAAAAJ:hF0r9nPyWt4C
20. Kryvenko O. P., Lizunov P. P., Vorona Yu. V., Kalashnikov O. B. Modelivannia termopruznykh vlastyvostei kompozytnoho materialu v zadachakh stiikesti bahatosharovykh obolonok [Modeling thermoelastic properties of composite materials in stability problems of multilayer shells. Management of complex systems development]. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*. Kyiv, 2023, no. 54, pp. 77 – 89. [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2023.54.77-89](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.54.77-89)
21. *Uglerodnye volokna i uglekompozity* [Carbon fibers and carbon composites]: per. s angl. / pod red. Je.Fitcera. Moskva: Mir, 1988. 336 p.
22. Kucher M. K., Zarazovskiy M. M. Otsinka mikromekhanichnykh modelei prohozhuvannia efektyvnykh konstant pruzhnosti voloknystykh kompozytiv [Evaluation of micromechanical models for predicting effective elastic constants of fibrous composites]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut»*. Seriya Mashynobuduvannia, 2010, no. 58, pp. 24-29.
23. Bazhenov V. A., Kryvenko O. P., Solovei M. O. *Nelineine deformuvannia ta stiikest pruznykh obolonok neodnorodnoi struktury* [Nonlinear deformation and stability of elastic shells of heterogeneous structure]. Kyiv: ZAT «Vipol», 2010. 316 p.
24. Kryvenko O. P., Lizunov P. P., Vorona Yu. V., Kalashnikov O. B. Vykorystannia momentnoi skhemy skinchenykh elementiv pry doslidzhenni tonkykh pruznykh obolonok neodnorodnoi struktury [Using the finite element moment scheme in the study of thin elastic shells of inhomogeneous structure]. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*. Kyiv, 2023, no. 53, pp. 52-62, [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2023.53.52-62](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.53.52-62).
25. Bazhenov V. A., Kryvenko O. P. *Stiikest i kolyvannia pruznykh neodnorodnykh obolonok pry termosylovykh navantazhenniakh* [Stability and oscillations of elastic inhomogeneous shells under thermal force loads]. Kyiv: Karavela, 2020. 187 p.
26. Krivenko O. P., Lizunov P. P., Vorona Yu. V., Kalashnikov O. B. A Method for Analysis of Nonlinear Deformation, Buckling, and Vibrations of Thin Elastic Shells of an Inhomogeneous Structure. *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles*. Kyiv: KNUBA, 2023. Issue 110, pp. 131–149.
27. Bazhenov V., Krivenko O. *Buckling and Natural Vibrations of Thin Elastic Inhomogeneous Shells*. Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. 97 p.
28. Kyrkach O.B., Konokhov V.I. Napruzhenno-deformovanyi stan ta mitsnist sharuvatykh kompozytnykh plastykiv iz navantazhenyimi otvoramy [Stress-strain state and strength of layered composite plastics with loaded holes]. *Materialy XXIV mizhnar. nauk.-prakt. konf. «Informatsiini tekhnologii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia» (MicroCAD-2016)*. Kharkiv. NTU «KhPI», 2016.
29. Smirnova Ya.O., Huriia I.M. Mikrostruktura ta mekhanichni

- vlastyvoſty sharuvatoho lytoho kompozytu BT-6/Al [Microstructure and mechanical properties of layered cast composite BT-6/Al.] ISSN 2077-1304. *Met. lit'e Ukr.*, 2022, vol. 30, no. 1 (328), 84-90 <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.01.084>
30. Du Y., Fan G., Yu T., Hansen N., Geng L., Huang X. Laminated Ti-Al composites: processing, structure and strength. *Materials Science & Engineering A*, 2016, Vol. 673, pp. 572–580. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.108>
 31. Padnuru Sripathy A., Gupta M. Insight Into Layered Metal Matrix Composites. *Encyclopedia of Materials: Composites*, 2021, Vol. 1, pp. 121–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819724-0.00021-5>
 32. Smirnova Y., Huriia I., Loboda P. Liquid phase fabrication technology of layered Ti/Al composite. *U.P.B. Scientific bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, 2021, Vol. 83, Iss. 4, pp. 273–282. URL: https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rezb3b_447954.pdf
 33. Smetankina N. V., Misiura S.Yu., Misiura Ye.Yu. Analiz deformuvannya sharuvatykh konstruktiv aerokosmichnoi tekhniki pry bahatofaktornomu navantazhenni [Analysis of deformation of layered aerospace structures under multifactor loading]. *Matematychni problemy tekhnichnoi mekhaniky – 2024 : materialy mizhnarodnoi naukovoï konferentsii*, 18–19, 22 kvitnia 2024 r. : tezy dopov. Dnipro, 2024, pp. 43–45. <http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/32847>
 34. Sierikova O., Strelnikova E., Gnitko V., Degtyarev K. Boundary calculation models for elastic properties clarification of three-dimensional nanocomposites based on the combination of finite and boundary element methods. In: 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 2021, pp. 351–356.
 35. Smetankina N., Ugrimov S., Kravchenko I., Ivchenko D. Simulating the process of a bird striking a rigid target. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2020*, pp. 711–721. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_71
 36. Shupykov A.N., Buzko Ya.P., Smetankina N.V., Uhrymov S.V. *Nestatsyonnarnie kolebaniya mnohosloinnykh plastyn y obolochek y ykh optymyzatsiya* [Unsteady vibrations of multilayer plates and shells and their optimization]. Kharkov. KhNĖU, 2004. 252p.
 37. Keramichni broneplyty – tekhnolohichna evolutsiia zakhystu [Ceramic armor plates – technological evolution of protection]. *Elektronnyi resurs*. <https://balistyka.ua/articles/keramichni-broneplyty-tekhnologichna-evolyutsiya-zakhystu.01.07.2024>
 38. Burlaienko V. M., Lvov H.I., Dimitrova–Burlaienko S. D. Doslidzhennia stiihosti metal-matrychnykh kompozytnykh balok zminnoho poperechnoho pererizu z aksialnohradiientnym armuvanniam [Study of the stability of metal-matrix composite beams of variable cross-section with axial gradient reinforcement]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*, 2025, no. 2, pp. 26–34. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2025.2.04>
 39. Burlayenko V.N., Kouhia R., Dimitrova S.D. Free vibration analysis of curvilinearly tapered axially functionally graded material beams. *Applied Sciences*, 2024. <https://doi.org/10.3390/app14156446>
 40. Burlayenko V.N., Sadowski T., Altenbach H. Efficient free vibration analysis of FGM sandwich flat panels with conventional shell elements. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022. <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1909191>
 41. Burlayenko V.N. A continuum shell element in layerwise models for free vibration analysis of FGM sandwich panels. *Springer*, 2021, Volume 33, pp. 1385–1407. https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=uk&user=CqTeRTIAAAAJ&csstart=20&pagesize=80&sortby=pubdate&citation_for_view=CqTeRTIAAAAJ_g5IzVfSwC
 42. Burlayenko, V.N., Altenbach, H., Sadowski, T.: An evaluation of displacement-based finite element models used for free vibration analysis of homogeneous and composite plates. *J. Sound Vib*, 2015, 358, 152–175.
 43. Hajlaoui, A., Chebbi, E., Wali, M., Dammak, F.: Geometrically nonlinear analysis of FGM shells using solid shell element with parabolic shear strain distribution. *Int. J. Mech. Mater. Des.*, 2020, 16, 351–366. DOI: 10.1007/s10999-019-09465-x
 44. Altenbach, H., Altenbach, J., Kissing, W. *Mechanics of Composite Structural Elements*, 2nd edn. Springer, Singapore, 2018.
 45. Burlayenko, V.N., Altenbach H., Sadowski, T. Dynamic fracture analysis of sandwich composites with face sheet/core debond by the finite element method. In: Altenbach, H., et al. (eds). *Dynamical Processes in Generalized Continua and Structures. Advanced Structured Materials*, 2019, vol. 103, pp. 163–194. Springer, Cham.
 46. Burlayenko V. N., Kouhia, R., Dimitrova, S. D. Free vibration analysis of curvilinearly tapered axially functionally graded material beams. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, no. 15, 6446. <https://doi.org/10.3390/app14156446>
 47. Burlayenko V.N., Sadowski T., Marsavina L. Free vibration analysis of functionally graded carbon nanotube reinforced beams with variable cross-section using the differential transform method. *Meccanica*, 2025, in press.
 48. Mykola Tkachuk, Anton Tkachuk. Large deformation of cable networks with fiber sliding as a second-order cone programming. *International Journal of Solids and Structures*, 2024, Vol. 298, pp. 112848/ <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2024.112848>
 49. Jubera R., Ridruejo A., González C., LLorca J. Mechanical behavior and deformation micromechanisms of polypropylene nonwoven fabrics as a function of temperature and strain rate. *Mech. Mater.*, 74 (2014), pp. 14–25. DOI 10.1016/j.mechmat.2014.03.007
 50. Kanno Y. *Nonsmooth Mechanics and Convex Optimization*. 9781420094244, CRC Press (2011). URL <https://books.google.se/books?id=52XMBQAAQBAJ>
 51. Ridruejo A., Jubera R., González C., LLorca J. Inverse notch sensitivity: Cracks can make nonwoven fabrics stronger. *J. Mech. Phys. Solids*, 77 (2015), pp. 61–69. DOI: 10.1016/j.jmps.2015.01.004
 52. Tkachuk M. Complementary energy principle for cable networks in terms of force vector variable. *Bull. Natl. Tech. Univ. KhPI Ser. Eng. CAD* (1) (2022), pp. 85–90. doi: 10.20998/2079-0775.2022.1.09
 53. Tkachuk M., Linder C. The maximal advance path constraint for the homogenization of materials with random network microstructure. *Phil. Mag.*, 2012, 92 (22), pp. 2779–2808. DOI: 10.1080/14786435.2012.675090
 54. Kanno Y., Ohsaki M. Contact analysis of cable networks by using second-order cone programming. *SIAM J. Sci. Comput.*, 2006, 27 (6), pp. 2032–2052. <https://doi.org/10.1137/S106482750343194>
 55. Negi V., Picu R. C. Mechanical behavior of cross-linked random fiber networks with inter-fiber adhesion. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2019, 122, pp. 418–434. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2019.11.003>
 56. Deoekar S., Picu R. C. Strength of stochastic fibrous materials under multiaxial loading. *Soft Matter*, 2021, 17(3), pp. 704–714. <https://doi.org/10.1039/D0SM01713B>
 57. Deoekar S., Yan Z., Picu R. C. Random Fiber Networks With Superior Properties Through Network Topology Control. *Journal of Applied Mechanics*, 2019, 86(8), pp. 081010. <https://doi.org/10.1115/1.4043828>
 58. Chen, N., Silberstein, M. N. A micromechanics-based damage model for non-woven fiber networks. *International Journal of Solid and Structures*, 2019, 160, pp. 18–31. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.10.009>
 59. Tkachuk M.M. Elastic Homogenization of Materials with Composite Network Structures. Published: 10 June 2022 Volume 263, pages 104–119, (2022). DOI:10.1007/s10958-022-05910-z
 60. Tkachuk M. M. Method of elastic homogenization of bimodal networks. *Visnyk Nats. Tekh. Univ. «KhPI» Ser. Mashynoznavstvo SAPR*, 2019, no. 7, 107–115. <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2019.7.17>
 61. Vaidzu K. *Variacionnye metody v teorii uprugosti i plastichnosti* [Variational methods in the theory of elasticity and plasticity]. M, Mir, 1987. 542p.
 62. Gol'denvejzer A. L. Teorija uprugih tonkih obolochek

[Theory of elastic thin shells]. M.: Nauka, 1976. 512 p.
63. Zienkiewicz O. C., R. L. Taylor, Govindjee S. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 87th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2024. 632 p.

Надійшла (received) 19.03.2026
Стаття прийнята до друку 21.04.2026
Опублікована 28.04.2026

Відомості про авторів / About the Authors

Ткачук Микола Анатолійович / Tkachuk Mykola A. – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; м. Харків, Україна; тел.: +380667146697; e-mail: tma@tmm-sapr.org; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4174-8213>

Грабовацький Андрій Володимирович / Grabovskiy Andrey – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел.: +380502881027; e-mail: andrej8383@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6116-0572>

Ткачук Микола Миколайович / Tkachuk Mykola M. – доктор технічних наук, старший дослідник, провідний науковий співробітник кафедри інформаційних технологій та систем колісних і гусеничних машин імені О.О. Морозова; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел.: +380667146697; e-mail: m.tkachuk@tmm-sapr.org; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4753-4267>

Васильєв Антон Юрійович / Vasiliev Anton – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; старший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; тел. +380675793843; e-mail: AVasiliev@tmm-sapr.org; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8106-0950>

Коба Андрій Миколайович / Koba Andrii – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна; тел.: +380996203009; e-mail: a.skoba89@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0162-9208>

Троценко Володимир Володимирович / Trotsenko Volodymyr – підполковник, Військовий інститут танкових військ при Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», ст. викладач кафедри «Експлуатація, озброєння та військова техніка»; м. Харків, Україна; тел.: +380938297005; e-mail: vvoova1102@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6537-7245>

Кислиця Денис Валерійович / Denys Kyslytsia – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна; тел.: +380989329032; e-mail: Denys.Kyslytsia@mit.khpi.edu.ua

Набоков Анатолій Володимирович / Nabokov Anatoliy – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна; e-mail: avnabokov@gmail.com

Рікунов Олег Миколайович / Rikunov Oleg – полковник, кандидат технічних наук, доцент, Національна академія Національної гвардії України, заступник начальника кафедри «Управління логістикою» ННІ ПКК; м. Харків, Україна; тел.: +380667146697; e-mail: rikunov317@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7581-7531>

Шаталов Олег Євгенович / Shatalov Oleg – кандидат технічних наук, Національна Академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного, доцент кафедри бронетанкової техніки, м. Львів, тел. 097-457-38-31, <https://orcid.org/0000-0001-8941-8734>, e-mail: shatl-oleg-ua@ukr.net

Карпов Вадим Олегович / Karпов Vadym – доктор філософії, старший викладач кафедри «Інформаційні технології і системи колісних та гусеничних машин імені О. О. Морозова; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: tma@tmm-sapr.org; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7851-2458>

Богач Андрій Станіславович / Bohach Andrii – кандидат технічних наук, командир самохідного артилерійського дивізіону військової частини А 4010, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0359-3450>; e-mail: bogach@tmm-sapr.org