

**А.В. ГРАБОВСЬКИЙ, М.М. ТКАЧУК, А.Ю. ВАСИЛЬЄВ, М.А. ТКАЧУК, О.С. ЛЬОЗНИЙ,
В.В. ТРОЦЕНКО, А.В. НАБОКОВ, В.Ю. СОЛОВЕЙ, А.С. БОГАЧ, О.М. РІКУНОВ, С.А. МАЛАКЕЙ**

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДВИЩЕНИХ ТАКТИКО-ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕГКОБРОНЬОВАНИХ МАШИН НА ОСНОВІ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ МІЦНОСТІ БРОНЕКОРПУСІВ ІЗ ГОМОГЕННИХ ТА КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

У роботі описано підхід до експрес-аналізу динамічного напружено-деформованого стану бронекорпусів легкоброньованих машин із композиційних матеріалів. Для цього визначається напружено-деформований стан, власні частоти коливань і власні форми коливань тестових «сэндвіч-бронепанелей». Зовнішні шари цих панелей – зі сталі, а внутрішній шар – із кераміки, пластика або гуми. Після аналізу напружено-деформованого стану, власних частот і власних форм коливань цих тестових панелей визначається деяка «еквівалентна» гомогенна бронепанель. Надалі властивості цієї еквівалентної панелі закладаються у розрахункову модель динамічного напружено-деформованого стану досліджуваного бронекорпусу легкоброньованої машини. Така експрес-модель дає можливість оперативного аналізу динамічних, міцнісних та жорсткісних характеристик бронекорпусів легкоброньованих машин на початкових етапах проєктних досліджень. Такий підхід може бути застосований і для аналізу захищеності бронекорпусів від дії кінетичних, фугасних, кумулятивних та боеприпасів інших типів. На завершальних етапах проєктних досліджень розроблені моделі потребують подальшого удосконалення. Проте у ході таких попередніх досліджень визначаються певні закономірності та тенденції. Вони дають можливість установити заходи із підвищення міцності та динамічних властивостей бронекорпусів легкоброньованих машин. Крім того, можна знизити рівень збурень у системах наведення стабілізації озброєння, яке установлені у бойових модулях. Проте у ході таких попередніх досліджень визначаються певні закономірності та тенденції. Вони дають можливість установити заходи із підвищення міцності та динамічних властивостей бронекорпусів легкоброньованих машин. Крім того, можна знизити рівень збурень у системах наведення стабілізації озброєння, яке установлені у бойових модулях. Ці модулі базуються на бронекорпусах бойових машин. У цілому розроблено комплексний підхід до підвищення тактико-технічних характеристик міцності, захищеності та точності ведення вогню за рахунок застосування композиційних матеріалів для виготовлення бронекорпусів легкоброньованих машин

Ключові слова: бронекорпус, легкоброньована машина, гомогенний матеріал, композиційний матеріал, «сэндвіч-бронепанель», напружено-деформований стан, власні частоти коливань, власні форми коливань

**A. GRABOVSKIY, M. M. TKACHUK, A. VASILIEV, M. A. TKACHUK, O. LOZNYI, V. TROTSSENKO,
A. NABOKOV, V. SOLOVEY, A. BOHACH, O. RIKUNOV, S. MALAKEY**

PROVIDING ENHANCED TACTICAL AND TECHNICAL CHARACTERISTICS OF LIGHTLY ARMORED VEHICLES BASED ON DETERMINING THE DYNAMIC STRENGTH OF ARMORED HOUSINGS MADE OF HOMOGENEOUS AND COMPOSITE MATERIALS

The paper describes an approach to express analysis of the dynamic stress-strain state of armored hulls of light armored vehicles made of composite materials. To do this, the stress-strain state, natural frequencies of oscillations and natural forms of oscillations of test "sandwich armored panels" are determined. The outer layers of these panels are made of steel, and the inner layer is made of ceramics, plastic or rubber. After analyzing the stress-strain state, natural frequencies and natural forms of oscillations of these test panels, some "equivalent" homogeneous armored panel is determined. In the future, the properties of this equivalent panel are incorporated into the calculation model of the dynamic stress-strain state of the studied armored hull of a light armored vehicle. Such an express model allows for an operational analysis of the dynamic, strength and stiffness characteristics of armored hulls of light armored vehicles at the initial stages of design research. This approach can also be used to analyze the protection of armored hulls from the effects of kinetic, high-explosive, cumulative and other types of ammunition. At the final stages of design research, the developed models require further improvement. During preliminary studies, certain patterns and trends are identified. These findings enable the establishment of measures to enhance the strength and dynamic properties of the armored hulls of light armored vehicles. Additionally, it is possible to reduce disturbances in the weapon stabilization and guidance systems installed in combat modules, which are based on the armored hulls of combat vehicles. A comprehensive approach has been developed to improve the tactical and technical characteristics of strength, protection, and firing accuracy by using composite materials for the manufacture of armored hulls of light armored vehicles.

Keywords: armored hull, lightly armored vehicle, homogeneous material, composite material, "sandwich armored panel", stressed-strained state, natural frequencies of oscillations, natural forms of oscillations

Вступ. Аналіз ходу бойових дій проти країни-агресора у 2022 – 2025 рр. продемонстрував декілька нових аспектів стосовно тактики застосування важких і легкоброньованих бойових машин (ЛБМ). Відповідно, це зміщує акценти у вимогах до тактико-технічних характеристик цих машин.

Зокрема, якщо взяти до уваги балістичну стійкість, то широке застосування противником крупнокаліберних кулеметів та малокаліберних автоматичних гармат (МАГ) висуває вимогу забезпечення підвищеної стійкості до куль та снарядів різних типів калібрами, наприклад, 12,7 ÷ 30 мм у різних проєкціях.

Якщо звернутися до ураження фугасними боеприпасами, то тут важлива і стійкість проти ударної хвилі, і до дії уламків (де в чому схожих із дією кінетичних боеприпасів – див. вище). Тут слід підкреслити, що дія фугасних боеприпасів

посилюється і зростаючою точністю обстрілів, і підвищеною потужністю боеприпасів. При цьому слід звертати увагу і на мінні обстріли, і на артилерійські та авіаційні боеприпаси тощо.

На бронекорпуси ЛБМ діють також кумулятивні боеприпаси, міни, ракети із різними чинниками ураження.

Окрім того, на додачу до зовнішніх чинників, на бронекорпус діють статичні та динамічні сили при подоланні перешкод та нерівностей місцевості, а також реактивні сили віддачі при здійсненні стрільби із власного штатного озброєння бойових модулів – кулеметів, гранатометів, МАГ тощо.

© А. В. Грабовський, М. М. Ткачук, А.Ю. Васильєв, М.А. Ткачук, О.С. Льозний, В.В. Троценко, А.В. Набоков, В.Ю. Соловей, А.С. Богач, О.М. Рікунов, С.А. Малакей, 2025

Стосовно цього озброєння: калібри і темпи стрільби із нього теж мають тренд на зростання.

Підсумовуючи, можна зазначити, що 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, не має 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. Якраз на дослідження доречності та ефективності застосування подібних матеріалів для виготовлення бронекорпусів ЛБМ спрямована ця робота.

Аналіз методів дослідження напружено-деформованого стану конструкцій із гомогенних та композиційних матеріалів. Дослідженню реакції бронекорпусів на дію різних чинників ураження присвячена значна кількість публікацій [1–14]. Зокрема, приділяється увага міцності та захищеності при дії мінного та інших типів ураження.

Так, у [1] описано проведення експериментальних досліджень різноманітних конструкцій вибуховим навантаженням, що є складним науково-технічним завданням. Дослідження реальних зразків потребує значних фінансових витрат, тому набуває актуальності масштабування цього процесу завдяки створенню макетів (зменшених копій реального об'єкта випробувань). Результати експериментальних досліджень на макетах можна використовувати для вивчення явищ у натурі, якщо дотримано розглянуті умови, що впливають з теорії подібності та розмірності [1].

У роботі [2] описано досвід проведення Антитерористичної операції на території Донецької та Луганської областей (АТО) та Операції об'єднаних Сил (ООС), який відкрив невідповідність існуючого рівня захисту бойових броньованих машин (ББМ) сучасних загрозам. Це спричинило втрати ББМ та особового складу внаслідок бойових пошкоджень різною номенклатурою засобів ураження. За даними роботи [2], основна частина ББМ знищена внаслідок масованих артилерійських обстрілів, що велись, в тому числі, й з території Російської Федерації.

Основними загрозами для ОБТ являються дві

протилегні, як по технічному рівню, так і по способу застосування, групи засобів ураження: перша – міни та саморобні вибухові пристрої і друга – РПГ, ПТРК, СПГ та стрілецька зброя. Тому, саме ці засоби є найбільш небезпечними для ББМ, що є характерним і для інших локальних конфліктів [2].

Практичний досвід випробувань захищеності ББМ показує, що забезпечення якісного виготовлення зварних бронекорпусів є суттєвою запорукою забезпечення й захищеності. З цією метою у роботі [2] проведено оцінку та систематизацію основних причин, що призводять до виникнення дефектів в зварних корпусах ББМ легкої категорії за масою та визначення основних напрямів їх попередження для уникнення зростання імовірності загибелі екіпажу ББМ.

Концепція побудови системи пасивного протимінного захисту ББМ має ґрунтуватися на передбаченні в його конструкції можливості встановлення додаткових захисних структур, для поетапного підвищення рівня протимінної стійкості відповідно існуючим загрозам, типу та завданням, що виконуються у роботі [2].

Розроблена у роботі [2] чисельна модель для дослідження пробиття ударниками з різною формою головної частини гомогенних перешкод.

У статті [3] представлено метод ідентування для оцінки міцності зварних з'єднань високоміцних легованих сталей, у тому числі основного металу, зони термічного впливу та зварного з'єднання, на виробництві після застосування обраних методів дефектоскопії як завершального етапу методів неруйнівного контролю. Методи неруйнівного контролю в основному використовуються для виявлення дефектів, їх розташування, розміру та природи. Метод ідентування дозволяє визначити як міцність з'єднання, так і міцність і розміри зони теплового впливу в процесі виробництва. Для підтвердження ефективності методу авторами проведено порівняльний аналіз твердості та границі міцності зварних з'єднань легованих сталей 30Х2ЦН2МФА та 28ГРА при поставці з листового прокату товщиною 6 мм (для виготовлення спеціальних конструкцій). Показано, що значення твердості за Брінеллем, отримані стаціонарним твердоміром ТШ-2, портативним твердоміром ERNST Computest SC та інструментальним ідентуванням, свідчать про однаковий характер розподілу твердості по довжині зразка, розрізаного поперек осі зварного з'єднання [3]. Характер розподілу граничних значень міцності, визначених методом ідентування, подібний до розподілу твердості за Брінеллем HBW. Встановлено, що відхилення граничних значень міцності, визначених методом ідентування, не перевищувало 3,7% [3].

У роботі [4] порівняно чисельні методи моделювання впливу вибуху на металеву пластину типу LOAD_BLAST; LOAD_BLAST_ENHANCED; Arbitrary Lagrangian-Eulerian; Particle Blast Method;

Smooth Particle Hydrodynamics, які реалізовані в програмі LS-DYNA. Адекватність і точність цих методів оцінюють залежно від відношення дальності до заряду ВР. Наведено переваги та недоліки кожного методу та рекомендації щодо їх використання за результатами даного моделювання та досвіду авторів статті [4].

У роботі [5] представленні результати дослідження взаємодії гранати реактивного протитанкового гранатомета із конструкцією захисного протикумулятивного екрану бойових броньованих машин. Розглянуто два варіанти виконання конструкції захисного протикумулятивного екрану-зі сталі Ст3сп та 30ХГСА. На основі отриманих результатів встановлено особливості взаємодії гранати із конструкцією захисного протикумулятивного екрану, що дозволяє сформулювати рекомендації до її вдосконалення.

Пористі речовини, здатні оборотно або необоротно поглинати рідину при зростанні тиску до певної величини (зазвичай сотень атмосфер), є перспективною основою для матеріалів, придатних для використання в пристроях демпфування високих ударних навантажень [6]. Такі матеріали можуть бути використані для створення амортизаторів нового покоління в системах захисту людей і обладнання від ударів і вибухів тощо [6]. Демпфування ударного навантаження відбувається за рахунок перетворення енергії удару в потенціальну енергію системи, яка накопичується і частково звільняється в оборотному процесі заповнення пор рідиною з наступним її виходом (інтрузія і екструзія відповідно) або розсіюється в процесі необоротного вторгнення [6]. Демпфування починається при досягненні сили, необхідної для початку вторгнення, при цьому ця сила залишається незмінною до повного заповнення пор, що «розтягує» імпульс у часі.

У роботі [7] представлені результати моделювання дії вибуху на металеву конструкцію з використанням різних розрахункових методів: LOAD_BLAST; LOAD_BLAST_ENHANCED; Arbitrary Lagrangian Eulerian; Particle Blast Method; Smooth Particle Hydrodynamics, які реалізовані в програмі LSDYNA. Оцінена адекватність і точність цих методів в залежності від коефіцієнта розстояння до вибухового речовини. Представлені переваги та недоліки кожного методу та рекомендації по їх використанню в результатах цього моделювання та досвід роботи авторів [7].

Як зазначається у [8], вкрай важливим є визначення спектру їх власних частот коливань та власних форм коливань. Із цією метою зазвичай застосовується метод скінченних елементів. При цьому необхідно обґрунтовувати параметри скінченно-елементної моделі, які забезпечують прийнятний рівень точності чисельного моделювання динамічних властивостей такого типу конструкцій. Із цією метою залучаються дані паралельно здійснюваних чисельних та експериментальних досліджень макету бронекорпусу бронетранспортера. Сам макет

верхньої проекції бронекорпусу виготовлено у відповідному масштабі. Матеріал – листовая сталь. Цей макет піддано динамічному збудженню на вібростенді. Фіксуються резонансні частоти збудження, а також власні форми коливань. Також здійснено ударно-імпульсне збудження макета бронекорпуса. Відгук на це збудження фіксується за допомогою акселерометрів. Надалі із цих осцилограм визначається спектр власних частот коливань. Паралельно здійснюється чисельне моделювання власних частот коливань і власних форм коливань макету бронекорпусу. Надалі результати чисельних і експериментальних досліджень порівнюються. Шляхом варіювання параметрів скінченно-елементної моделі досягається задовільна відповідність результатів чисельних розрахунків та експериментальних вимірювань. Зокрема, визначаються: прийнятний тип скінченних елементів, що застосовуються; кількість скінченних елементів, необхідна для задоволення точності чисельного моделювання динамічних властивостей конструкцій подібного типу; зони рекомендованого згущення-розрідження сітки скінченних елементів тощо. За результатами досліджень установлені параметри скінченно-елементних моделей, які можуть бути застосовані для дослідження динамічних процесів і властивостей натурних бронекорпусів легкоброньованих машин [8].

У статті [9] наведено результати експериментального дослідження впливу властивостей матеріалу на реакцію пластин, що піддаються вибуховому навантаженню. Експериментально досліджено руйнування м'якої сталі, броньової сталі, алюмінієвого сплаву та армованих волокнами полімерних композитних пластин за допомогою детонації дисків пластичної вибухівки на малих відстанях. Постійне зміщення середньої точки збільшується лінійно зі збільшенням імпульсу для кожного типу матеріалу, аж до розриву. При більшій масі заряду пластини з м'якої сталі демонстрували пластичний розрив, тоді як пластини з броньової сталі (які розривалися за того самого імпульсу) демонстрували більш крихкий тип руйнування. Пластини з алюмінієвого сплаву демонстрували ознаки плавлення та розпилення радіально назовні, що призвело до втрати матеріалу в центрі пластини з подальшим розривом при сильніших імпульсах. Полімерний композит, армований волокнами, продемонстрував ознаки руйнування волокон при нижчих імпульсах, ніж інші матеріали еквівалентної маси. Не було встановлено, що безрозмірний імпульс розриву корелює з міцністю на розтяг або пластичністю матеріалу, але було встановлено, що він зростає зі збільшенням питомої енергії на розрив (отримано в результаті квазістатичних випробувань на розтяг). Таким чином, енергопоглинаюча здатність матеріалів, отримана в результаті простих випробувань на розтяг, може дати приблизну інформацію про їх ударну здатність [9].

У статті [10] наведено результати експериментального дослідження впливу

властивостей матеріалу на реакцію пластин, що піддаються вибуховому навантаженню. Експериментально досліджено руйнування м'якої сталі, броньової сталі, алюмінієвого сплаву та армованих волокнами полімерних композитних пластин за допомогою детонації дисків пластичної вибухівки на малих відстанях. Постійне зміщення середньої точки збільшується лінійно зі збільшенням імпульсу для кожного типу матеріалу, аж до розриву. При більшій масі заряду пластини з м'якої сталі демонстрували пластичний розрив, тоді як пластини з броньової сталі (які розривалися за того самого імпульсу) демонстрували більш крихкий тип руйнування. Пластини з алюмінієвого сплаву демонстрували ознаки плавлення та розпилення радіально назовні, що призвело до втрати матеріалу в центрі пластини з подальшим розривом при сильніших імпульсах. Полімерний композит, армований волокнами, продемонстрував ознаки руйнування волокон при нижчих імпульсах, ніж інші матеріали еквівалентної маси. Не було встановлено, що безрозмірний імпульс розриву корелює з міцністю на розтяг або пластичністю матеріалу, але було встановлено, що він зростає зі збільшенням питомої енергії на розрив (отримано в результаті квазістатичних випробувань на розтяг). Таким чином, енергопоглинаюча здатність матеріалів, отримана в результаті простих випробувань на розтяг, може дати приблизну інформацію про їх ударну здатність [10].

Сучасні легкі балістичні броні зазвичай являють собою багатошарові конструкції з низькою щільністю. Метою дослідження [11] було оцінити можливість використання багатошарових конструкцій для систем полегшеної броні, які можуть бути використані як куленепробивні балістичні панелі бойових вертольотів та іншої легкої військової техніки. Досліджувані багатошарові структури були виготовлені на основі арамідних тканин, тонких листів алюмінієвого сплаву 2024-T3 та кераміки Al_2O_3 і SiC . Додатково оцінено вплив клейових з'єднань між компонентами балістичних панелей на їх захисні властивості. Поглинальну енергію сферичного снаряда визначали за допомогою лабораторного стенду, що складається з одноступінчатої гелієвої газової гармати та цифрової високошвидкісної камери. Дослідження проникнення на обраних багатошарових панелях також було проведено з використанням боєприпасів Парабелум. Було показано, що ламіновані структури, що складаються з тонких шарів металу та арамідної тканини, вказують на нижче співвідношення поглинання енергії до основної ваги композиту, ніж аналогічні співвідношення для металевих листів або тканин, які використовуються для виготовлення ламінованих структур. Так само сендвічі з пухких арамідних тканин демонструють більшу балістичну стійкість порівняно з полімерними композитами з таких тканин. Також було продемонстровано доцільність використання керамічного компонента як окремого шару, в якому

керамічні сегменти склеєні між двома шарами тонкого металевого листа [11].

У роботі [12] експериментально та чисельно проаналізовано реакцію на удар бронежилета, що складається з керамічної пластини з поліетиленом надвисокої молекулярної маси (UHMWPE), армованого волокном, і шарів волокон UHMWPE, що екранують блок балістичного желатину [13].

Було експериментально та чисельно проаналізовано реакцію на удар бронежилета, що складається з керамічної пластини з поліетиленом надвисокої молекулярної маси (UHMWPE), армованим волокном, і шарів волокон UHMWPE, що екранують блок балістичного желатину [13].

Це сурогатна модель для вивчення ушкоджень тулуба людини, спричинених кулею, яка влучила в бронежилет, одягнений на людину. Фотографії, зроблені високошвидкісною камерою, використовуються для визначення деформації броні та желатину. Максимальна глибина тимчасової порожнини, утвореної в балістичному желатині, і піковий тиск 40 мм за центром передньої поверхні желатину, що контактує з бронею, становлять відповідно ~ 34 мм і ~ 15 МПа. Матеріальна модель Джонсона-Холмквіста була використана для моделювання деформацій і руйнування кераміки. Композит, армований волокном UHMWPE, і шари волокон UHMWPE моделюються як лінійно-пружні ортотропні матеріали. Желатин моделюється як гіпереластичний матеріал, що залежить від швидкості деформації. Значення параметрів матеріалу взяті з відкритої літератури. Виявлено, що обчислена еволюція тимчасової порожнини, утвореної в желатині, якісно узгоджується з тією, що спостерігається в експериментах. Крім того, розраховані часові історії середнього тиску в чотирьох точках желатину узгоджуються з відповідними експериментально вимірюваннями [13]. Максимальний тиск у точці та глибина тимчасової порожнини, що утворюється в желатині, можуть бути прийняті як міри тяжкості тілесних ушкоджень, спричинених ударом; напр. див. стандарт Національного інституту юстиції США 0101.06 «Балістична стійкість бронежилетів».

На даний момент в Україні ведеться активна робота щодо підвищення захищеності особового складу та військової техніки силових структур. Актуальним завданням є створення нових броньових матеріалів, які відповідають за своїми характеристиками сучасним вимогам, та розробка надійних кулестійких захисних конструкцій [14]. Їх створення потребує детального дослідження щодо оцінки взаємодії високошвидкісного елемента з перешкодою. З появою нових бронематеріалів та технологій їх виробництва змінюється і модель високошвидкісної взаємодії. Однак, більшість існуючих методик дають невірну оцінку процесів такої взаємодії через появу нових параметрів, пов'язане з удосконаленням технологій виробництва. Має місце недостатня вивченість процесів високошвидкісного зіткнення вражаючого

елементу з багатошаровою перешкодою. Процес взаємодії вражаючого елемента та багатошарової перешкоди на відміну від гомогенної більш складний, і на його результат впливає більше параметрів, наприклад характеристики шарів, параметри з'єднання шарів та інші. Усі ці параметри необхідно оцінювати при проведенні експериментальних досліджень. Представлена вдосконалена методика проведення експериментальних досліджень щодо перевірки балістичної стійкості багатошарових броньованих структур, що виготовлені з використанням нових технологій виробництва. Наведено умови постановки експерименту і порядок його проведення. Методика рекомендується для застосування в дослідженнях, що пов'язані з вибором і оцінюванням зразків, які можна застосовувати в подальшому для виготовлення засобів індивідуального бронезахисту військовослужбовця від вогнепальної зброї за 3–6-м класами захисту. Отримані результати із оцінки запропонованих характеристик та параметрів, які складають важливі властивості перешкоди–бронепробивальність і балістична стійкість, можуть бути застосовані для проведення аналізу ефективності використання багатошарових броньованих структур у засобах індивідуального бронезахисту та для створення і коригування імітаційної моделі процесу взаємодії уражаючого елемента з багатошаровою перешкодою [14].

Важливою обставиною, що супроводжує описані вище дослідження, є аналіз або відомих технічних рішень бронекорпусів, або їхніх елементів, або розгляд декількох варіантів. У той же час у більш широкій постановці мова може йти про синтез складу і структури матеріалів, із яких виготовляються елементи бронекорпусів. Така постановка правомірна, проте (в силу зазначених вище обставин) занадто обширна. Тому у цій роботі увага зосереджується на сендвіч-структурах. Зокрема, такі структури формуються у т.з. «функціонально градієнтних матеріалах» (ФГМ) [15–23].

У огляді [16] викладено сучасні тенденції теоретичних розробок, нові конструкції та сучасне застосування сендвіч-конструкцій. Огляд [16] починається з обговорення аналітичних моделей і методів аналізу сендвіч-структур, а також типових проблем використання або порівняння цих моделей. Нові конструкції сендвіч-структур далі з'ясовуються, зосереджуючись на різноманітних ядрах, введенні нанотрубок і розумних матеріалів в елементи сендвіч-структури, а також на використанні функціонально градієнтованих конструкцій. Розглянуто приклади проблем, з якими стикаються розробники та проектувальники сендвіч-конструкцій, включаючи типові пошкодження, реакцію при різних навантаженнях, вплив навколишнього середовища та пожежу. Зразки застосування сендвіч-структур, включені в огляд [16], зосереджені на аерокосмічній, цивільній та морській інженерії, електроніці та біомедичних областях. Нарешті, автори пропонують перелік

областей, де, на їхню думку, є гостра потреба в подальших дослідженнях [16].

Ефективна скінченно-елементна модель, заснована на звичайних елементах оболонки, доступних в програмному забезпеченні ABAQUS, була розроблена для аналізу вібрації FGM одношарових і сендвіч-панелей у роботі [17]. Розглянуто застосування до багатошарових пластин із шаром FGM, вбудованим як серцевина або листіві листи з різними градаціями матеріалу по товщині у формі степеневого (P-FGM), сигмоподібного (S-FGM) та експоненціального (E-FGM) розподілів. Визначена користувачем підпрограма матеріалу UMAT була використана для реалізації функціонально градованих властивостей конститутивного шару FGM. Чисельні дослідження у роботі [17] наведені для коливань одношарових і сендвіч-плит, що підлягають різним граничним умовам і з різноманітними структурними параметрами, такими як розмір прольоту до товщини, товщина та співвідношення сторін, а також показник об'ємної частки. Дослідження показали дуже хорошу узгодженість між поточними результатами та наявними в літературі, які підтвердили точність розробленої моделі за мінімальних обчислювальних витрат. Це підкреслює ефективність стратегії моделювання на основі оболонки, запропонованої для розрахунків. Ряд чисельних рішень, отриманих у дослідженні [17], розширює результати відомих прикладів тестування та може служити додатковими еталонними даними для інших аналітиків.

Дослідження [18] спрямоване на аналіз вібрації функціонально градуєнтованих пористих балок з нерівномірним прямокутним поперечним перерізом, вивчаючи чотири розподіли пористості по товщині балки. Використовуючи модель Ейлера–Бернуллі та принцип Гамільтона, виведено рівняння руху. Розглядаються чотири різні граничні умови (затиснуті – затиснуті, без затиснутих, затиснуті – закріплені та закріплені – закріплені), а отримане рівняння розв'язано за допомогою методу диференціального перетворення. Перевірка точності забезпечується шляхом порівняння з рішеннями для власних частот, знайденими в існуючій літературі. Дослідження [18] надає валідовані рішення щодо власної частоти для функціонально градуєнтованих пористих балок з нерівномірним прямокутним поперечним перерізом, підтверджуючи точність запропонованого методу. Комплексне параметричне дослідження [18] розкриває вплив різних факторів на власні частоти, включаючи об'ємні частки пористості, типи розподілу пористості, коефіцієнти конусності та граничні умови.

Функціонально градуєнтовані пористі структури (FGPS), що характеризуються безперервним просторовим градієнтом як пористості, так і властивостей матеріалу, розглядаються як еластичні структури нового покоління. Стаття [19] присвячена огляду існуючих досліджень FGPS і

висвітленню важливих досягнень у цій новій галузі. Він складається з: (i) короткого вступу до пористих матеріалів і пористих матеріалів із функціонально градацією (FGPM); (ii) розробка ключових факторів і мікромеханічних моделей, пов'язаних із властивостями матеріалу FGPM; (iii) комплексний огляд механічного аналізу FGPM; (iv) детальне обговорення основних викликів і напрямків майбутніх досліджень; (v) висновок.

У статті [20] вперше досліджується поведінка вигину багат шарових панелей, що складаються з різноспрямованих функціонально градуєваних пористих графенових армованих композитів (GRC), що спираються на двопараметричну еластичну основу Вінклера-Пастернака на основі пошарової моделі вищого порядку з безперервністю міжшарових напружень. Оскільки властивості матеріалу переривчасто розподіляються по товщині певної багат шарової структури та різнонаправлено градуєються в кожному шарі панелей, що спричинено розподілом як графену, так і пористості, традиційні теорії пластин вищого порядку мають труднощі з ефективним прогнозуванням безперервних полів напруги. З цієї причини запропонована модель використовує функції інтерполяції вищого порядку та кускові описи для полів поперечних напружень зсуву, щоб отримати точні результати, що задовольняють неперервність міжшарових напружень, враховуючи розподіл властивостей матеріалу вздовж напрямку товщини та багат шарову структуру панелі. Крім того, для отримання ефективних чисельних результатів для різноспрямованих функціонально градованих матеріалів запропонована пошарова модель вищого порядку поєднується з градуєваним методом кінцевих елементів (GFEM) шляхом вибірки властивостей матеріалу безпосередньо в точках Гауса в кожному елементі. Нарешті, представлені чисельні приклади для перевірки точності та ефективності запропонованої моделі, а також досліджено вплив пористості та структури розподілу графену, масової частки графену, коефіцієнта пористості та параметрів пружної основи [20].

Najibi A., Kianifar M., Ghazifard P. дослідили чисельний аналіз власної частоти 2D функціонально градуєваного (FG) усіченого товстого порожнистого конуса з використанням теорії 3D пружності [21].

У статті [22] проведено порівняння одновимірної (1D) та тривимірної (3D) моделей для моделювання вільних коливань балок з аксіально функціонально градієнтованого матеріалу (AFGM) з нерівномірним поперечним перерізом. Обидві моделі були побудовані за допомогою ABAQUS, і проблема власних значень була вирішена для визначення власних частот і відповідних форм мод. Визначені підпрограми моделі матеріалу (UMAT) були розроблені з використанням 1D балки або 3D гексагональних градуєваних кінцевих елементів для впровадження градієнтів матеріалу у відповідні

моделі кінцевих елементів. Ефективність обох моделей була оцінена з використанням даних для балок з неоднорідним поперечним перерізом і профілів градації матеріалу, для яких власні частоти були доступні в літературі. Точність і ефективність кожного запропонованого підходу моделювання оцінювали шляхом порівняння отриманих результатів. Як правило, відмінності між 1D і 3D моделями стають більш вираженими, оскільки геометрична складність і неоднорідність матеріалу AFGM зростає, особливо для високочастотних режимів.

При зверненні до робіт [15, 23] можна зазначити, що до бронекорпусів ЛБМ пред'являються різноманітні вимоги. Це, своєю чергою, змушує підшукувати для їх виготовлення різних матеріалів. Зокрема, мова йде про композиційні структури [15].

Таким чином, маємо, з одного боку, прямий інтерес до застосування композиційних матеріалів при проектуванні бронекорпусів ЛБМ, з іншого, – певний розвиток методів розрахунку напружено-деформованого стану конструкцій із композитних матеріалів. Проте, як уже зазначалося, стосовно матеріалів бронекорпусів висувається цілий комплекс вимог, які тільки розробленими моделями та методами досліджень не можуть бути охоплені.

Із урахуванням зазначених обставин слід вважати за доцільне зосередити увагу на розробленні підходів до експрес-аналізу динамічного напружено-деформованого стану конструкцій елементів бронекорпусів ЛБМ із гомогенних та композиційних матеріалів.

Мета роботи – формування загальних підходів, моделей та методів досліджень динамічного напружено-деформованого стану елементів бронекорпусів легкоброньованих машин, виготовлених із гомогенних та композиційних матеріалів, на прикладі аналізу власних частот коливань і власних форм коливань (ВЧК і ВФК) конструкцій «сендвіч-бронепанелей».

Загальна методологія досліджень динамічного напружено-деформованого стану елементів бронекорпусів легкоброньованих машин. Як уже зазначалося, бронекорпус ЛБМ є основним силовим, компоновочним та захисним елементом, який піддається комплексу різноманітних впливів, а, отже, і критеріїв при обґрунтуванні проектно-технологічних рішень елементів бронекорпусів. Тому, зосередившись на частинній задачі визначення власних частот коливань і власних форм коливань елементів бронекорпусу, продемонструємо методологію досліджень, яка пропонується до реалізації.

На розвиток підходу, описаного у [15], дослідження власних частот і форм коливань здійснюється у декілька етапів. Спочатку розглядається тестова «сендвіч-бронепанель», яка містить два шари зі сталі, між якими розміщується шар із матеріалу типу «кераміка», «пластик» або «гума». Із тих міркувань, що густина їх матеріалів

ρ та фізико-механічні характеристики (модуль пружності E та коефіцієнт Пуансона ν) можуть варіюватися у широких межах, то саме ці

властивості прийняті як варійовані параметри. Тестова конструкція показана на рис. 1.

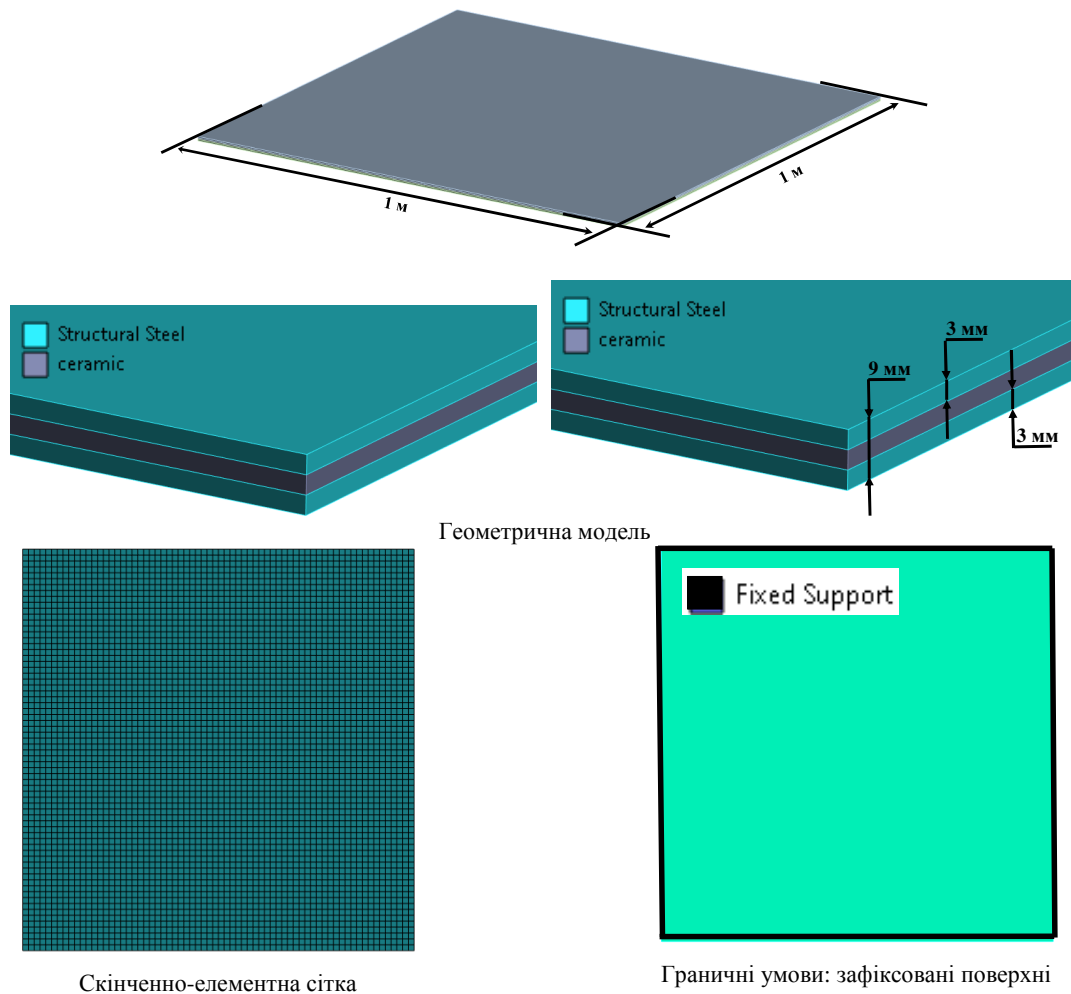


Рисунок 1 – Конструкція тестової сендвіч-бронепанелі

Після визначення впливу цих варійованих параметрів на спектри ВЧК і ВФК будується модифікована скінченно-елементна модель тестового варіанту бронекорпусу. На цій моделі визначаються загальні закономірності змін ВЧК і ВФК досліджуваного бронекорпусу.

Аналіз спектрів власних частот коливань і власних форм коливань тестової «сендвіч-бронепанелі». У тестовій панелі усі три шари матеріалів мають однакову товщину.

До розгляду вводяться варійовані параметри: $p_1 = E_0/E_{ст}$, де E_0 – модуль пружності матеріалу проміжного шару між стальними шарами (модуль пружності $E_{ст} = 210$ GPa; $p_2 = \rho_0/\rho_{ст}$, де ρ_0 – густина матеріалу проміжного шару, $\rho_{ст} = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³ – густина сталі.

Розглядаються діапазони варіювання:

$$\begin{aligned} p_1 &\in [0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5], \\ p_2 &\in [0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25]. \end{aligned} \quad (1)$$

Контролюються спектри ВЧК ω_i та ВФК λ_i :

$$\Omega_i = \frac{\omega_i(p_1, p_2)}{\omega_i(1,1)}; \lambda_i = \lambda_i(p_1, p_2), i = 1, 2, \dots (2)$$

Шляхом варіювання p_1, p_2 вдається визначити параметричні залежності (2).

На рис. 2-9 наведені власні частоти коливань та власні форми коливань за різних p_1, p_2 .

Крім того, можливо визначити напружено-деформований стан тестових «сендвіч-бронепанелей», які піддаються тиску $q = 1$ МПа, що розподілений рівномірно на всій її площі по нормалі до поверхні.

Контролюються два параметри:

$$W = w_{\max}^-(p_1, p_2) / w_{\max}^-(1,1), \quad (3)$$

$$\Sigma = \sigma_{\max}(p_1, p_2) / \sigma_{\max}(1,1), \quad (4)$$

де $w_{\max}^-$ – максимальний прогин «сендвіч-бронепанелі»,

$\sigma_{\max}$ – максимальне напруження за Мізесом у цій панелі.

На рис 10–13 наведені залежності $W(p_1, p_2)$, $\Sigma(p_1, p_2)$.

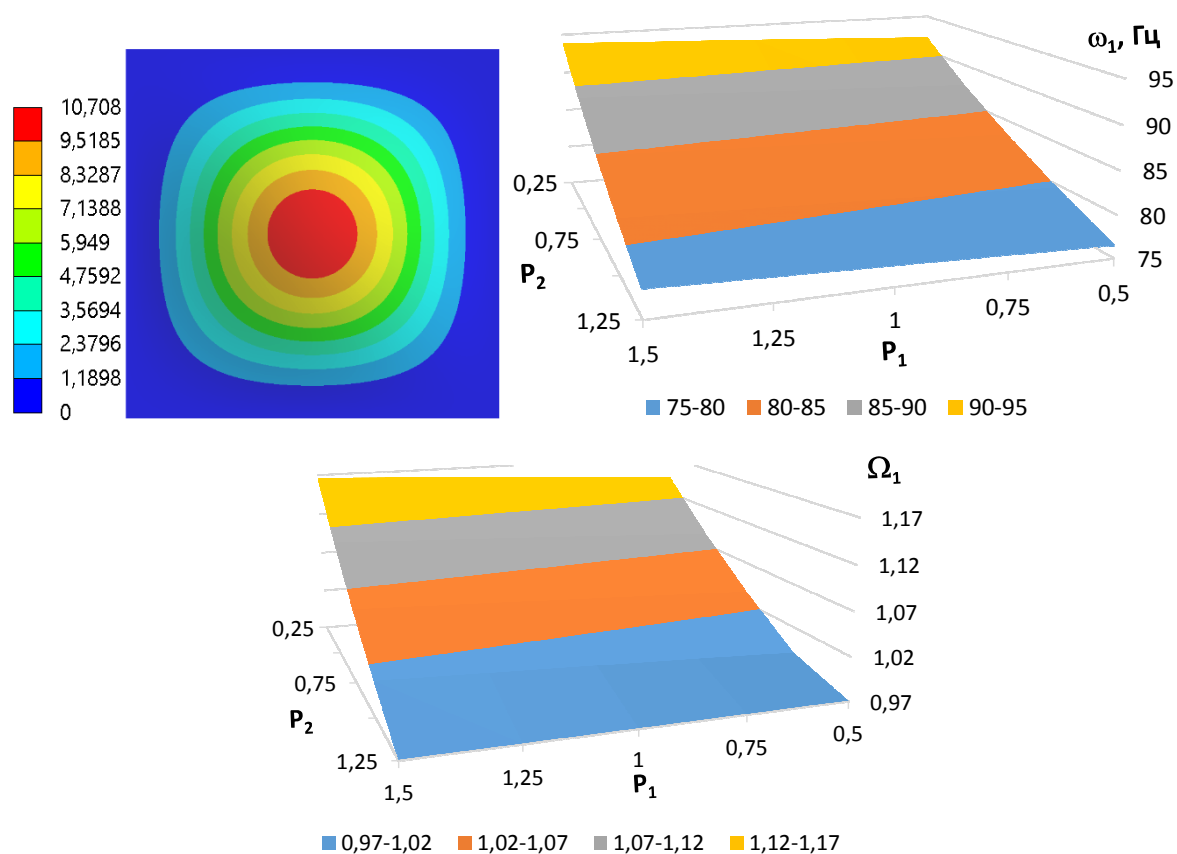


Рисунок 2 – Перша власна форма та залежність частоти від p_1 та p_2

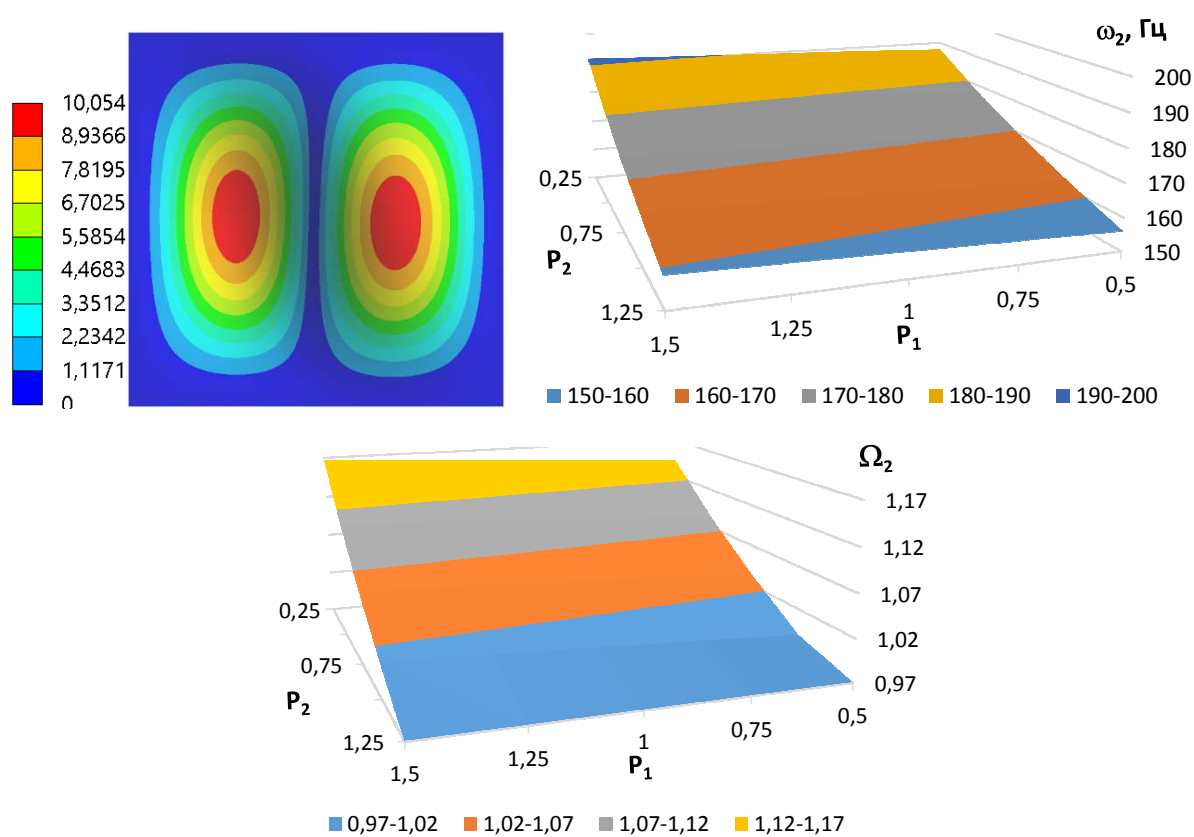
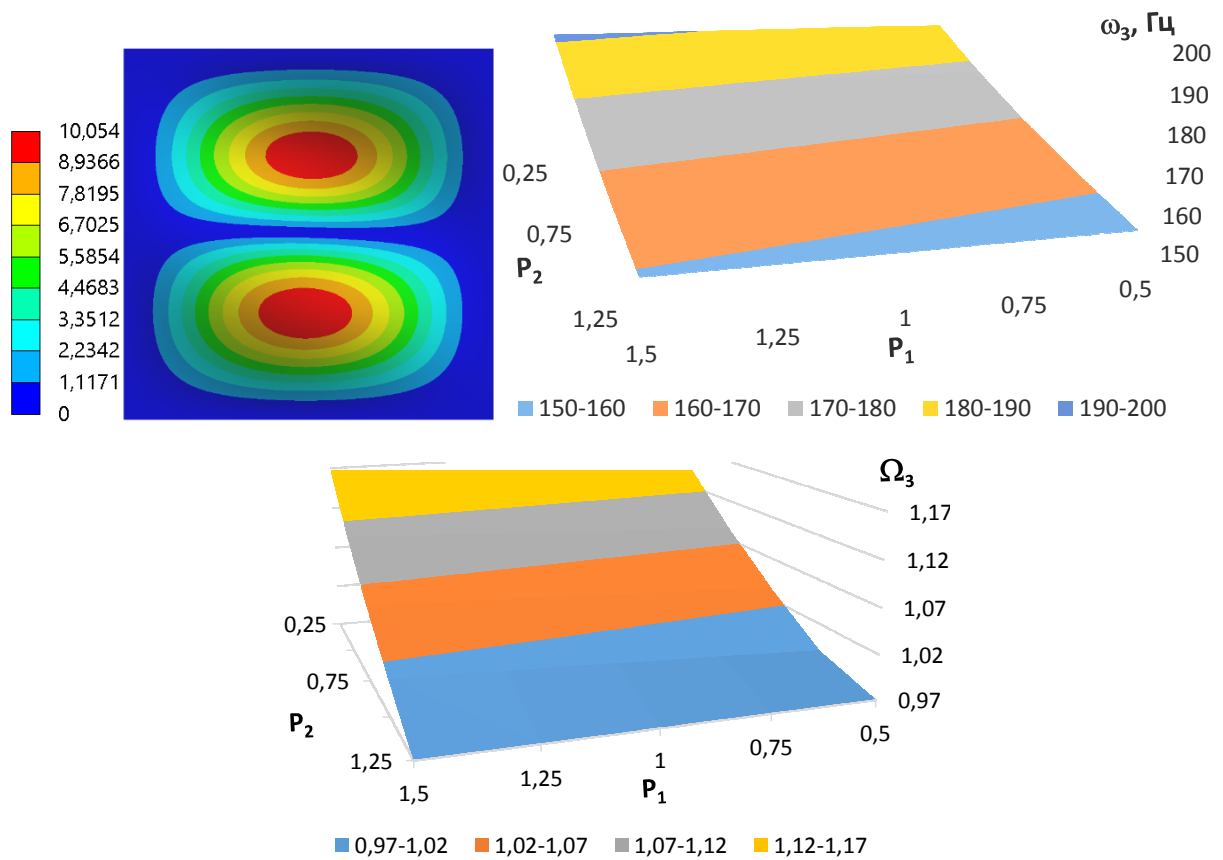
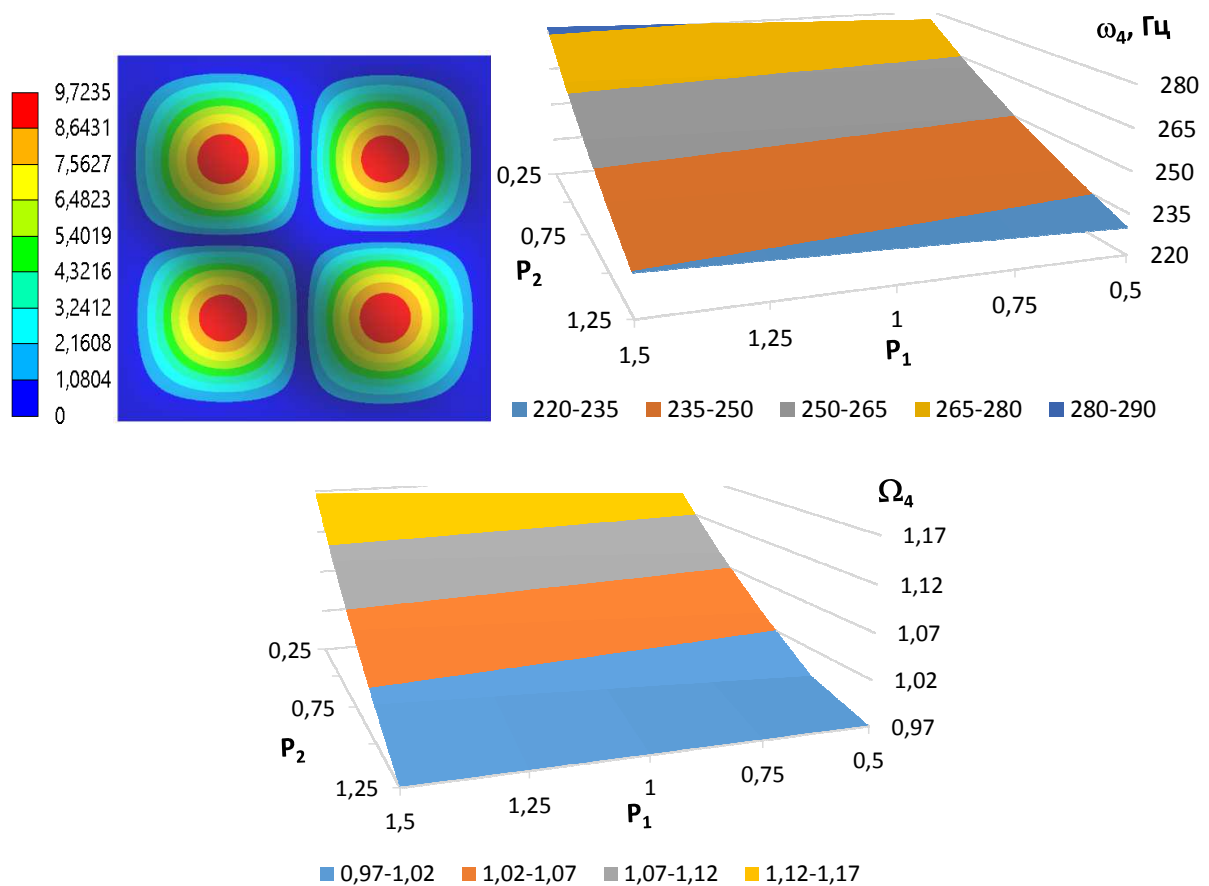
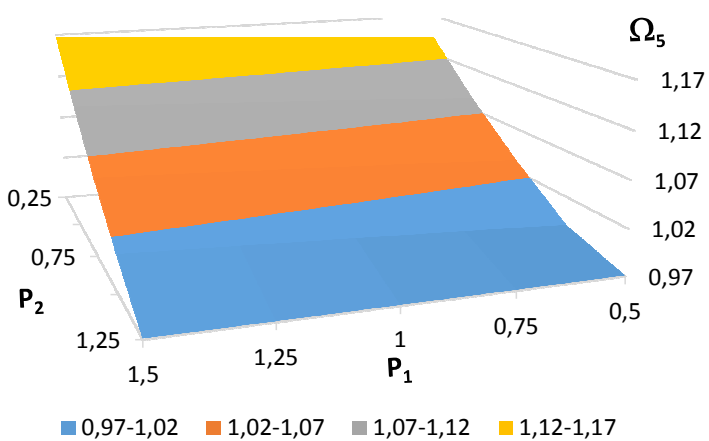
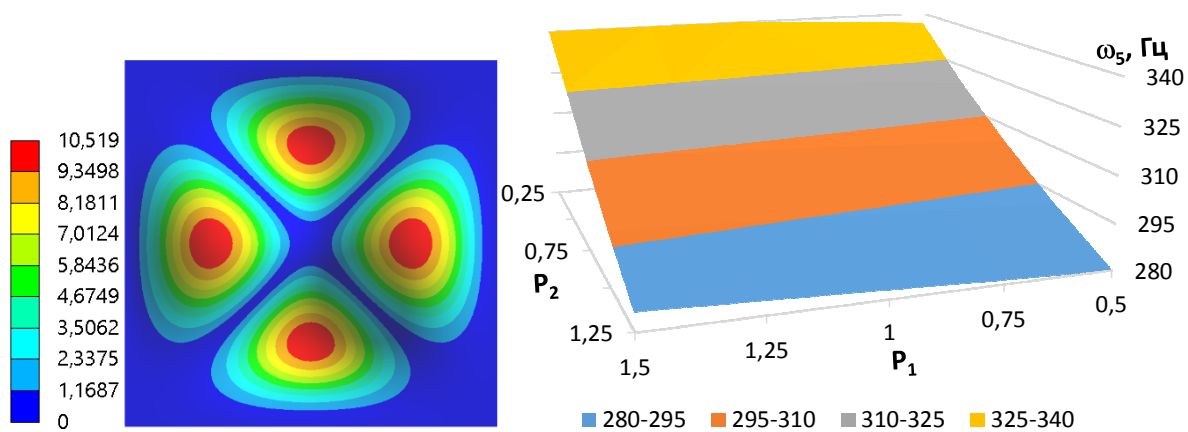
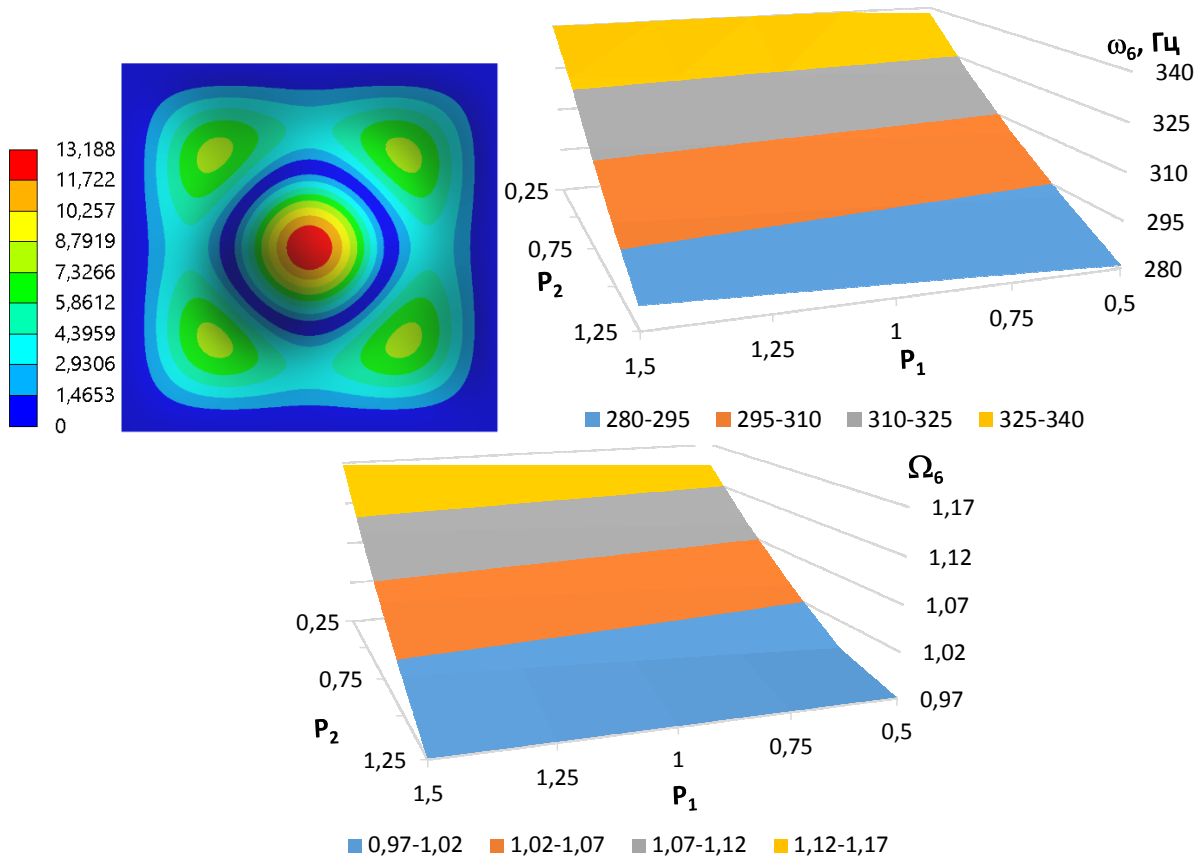
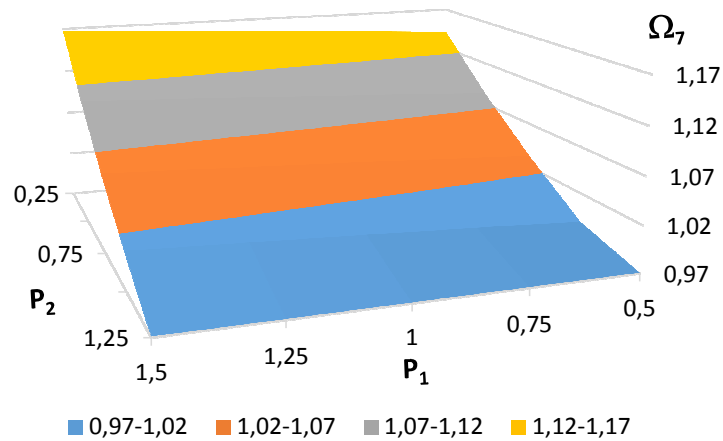
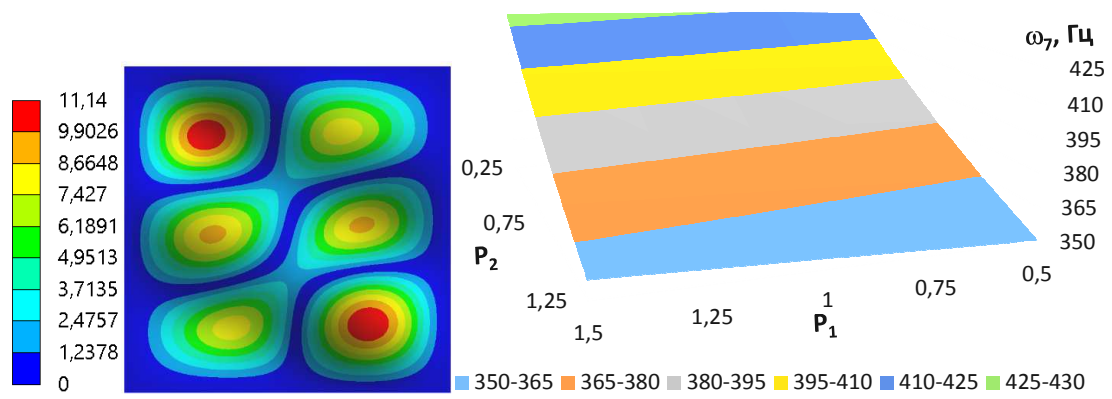
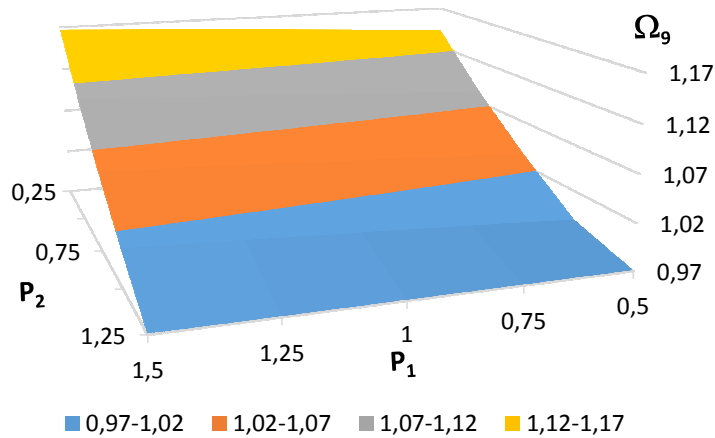
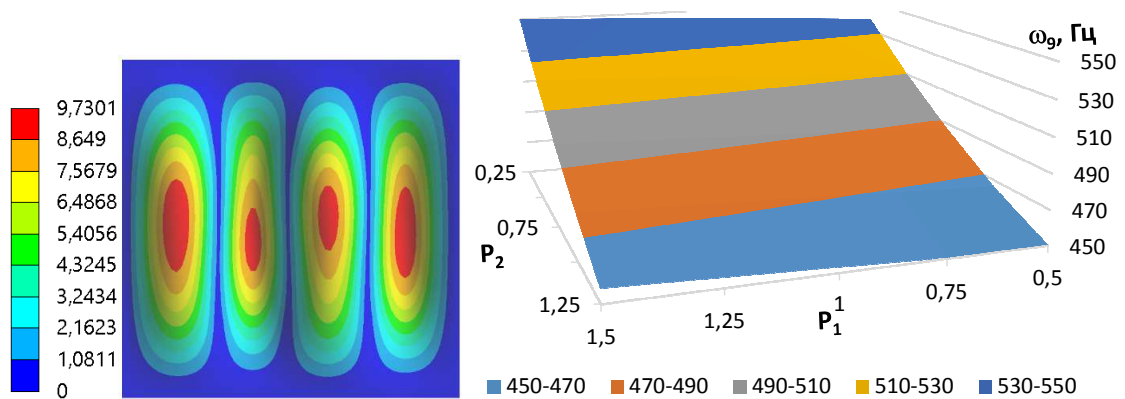


Рисунок 3 – Друга власна форма та залежність частоти від p_1 та p_2

Рисунок 4 – Третя власна форма та залежність частоти від p_1 та p_2 Рисунок 5 – Четверта власна форма та залежність частоти від p_1 та p_2

Рисунок 6 – П'ята власна форма та залежність частоти від p_1 та p_2 Рисунок 7 – Шоста власна форма та залежність частоти від p_1 та p_2

Рисунок 8 – Сьома власна форма та залежність частоти від p_1 та p_2 Рисунок 9 – Восьма власна форма та залежність частоти від p_1 та p_2

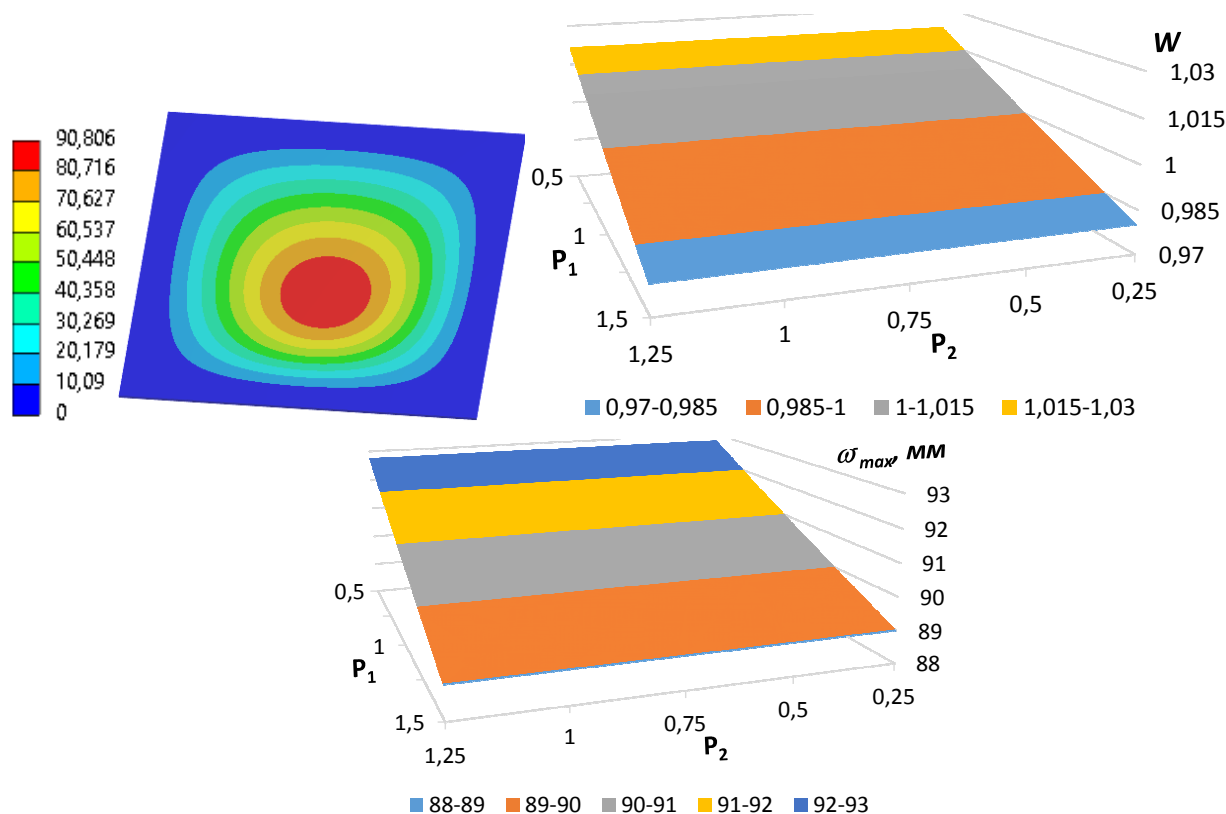


Рисунок 10 – Відносний W та реальний максимальний прогин «сэндвіч-бронепанелі» від p_1 та p_2 , віднесений до сталюї броне панелі

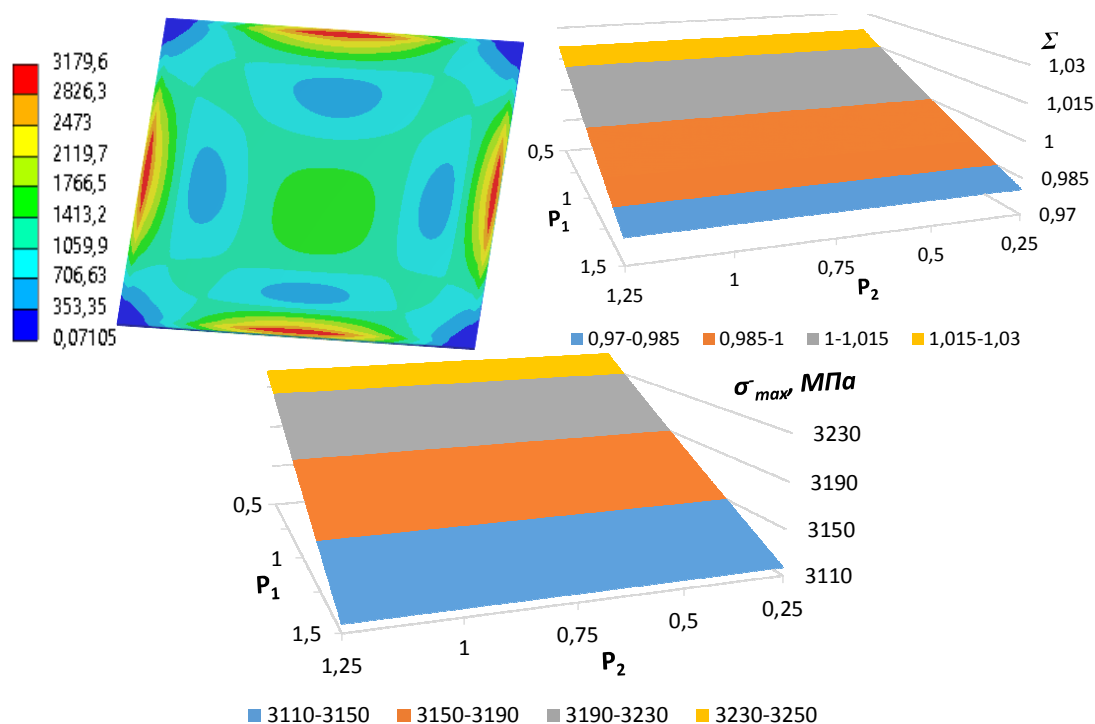


Рисунок 11 – Відносні та реальні максимальні еквівалентні напруження за Мізесом «сэндвіч-бронепанелі» від p_1 та p_2 , віднесені до сталюї броне панелі

Аналіз результатів, наведених на рис. 2–13, дає підстави для висновків про те, що власні форми коливань λ_i достатньо консервативні, тобто слабо залежать від властивостей матеріалів проміжного шару. Що стосується власних частот коливань ω_i , то вони підвищуються. Рівень підвищення – до 20%.

Що стосується напружено-деформованого стану, то рівні прогинів і напружень також підвищуються, причому на рівні 5-15%.

Таким чином, із точки зору моделювання динамічного напружено-деформованого стану «сэндвіч-бронепанелей» можна ввести до розгляду

деяку «еквівалентну» гомогенну бронепанель із характеристиками ρ^* , E^* . Ця «еквівалентна» бронепанель матиме також «зведену» товщину h^* .

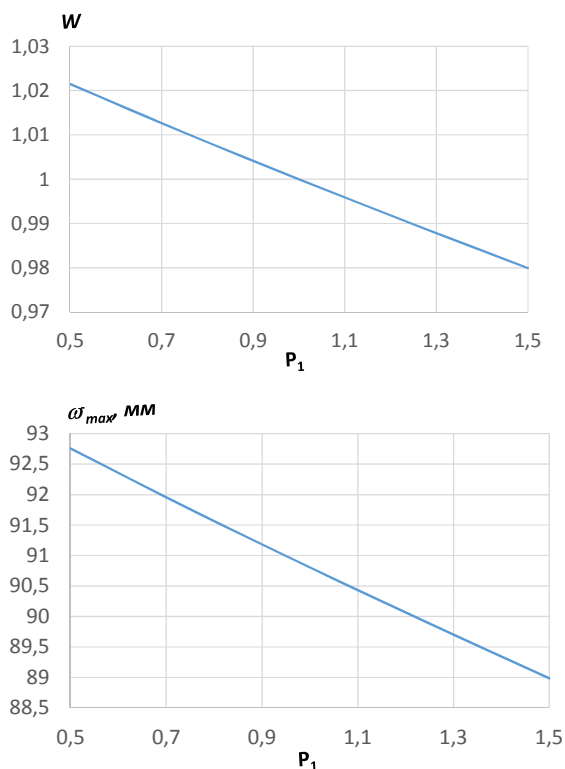


Рисунок 12 – Відносний W та реальний максимальний прогин «сендвіч-бронепанелі» від p_1 та p_2 , віднесені до сталюї бронепанелі

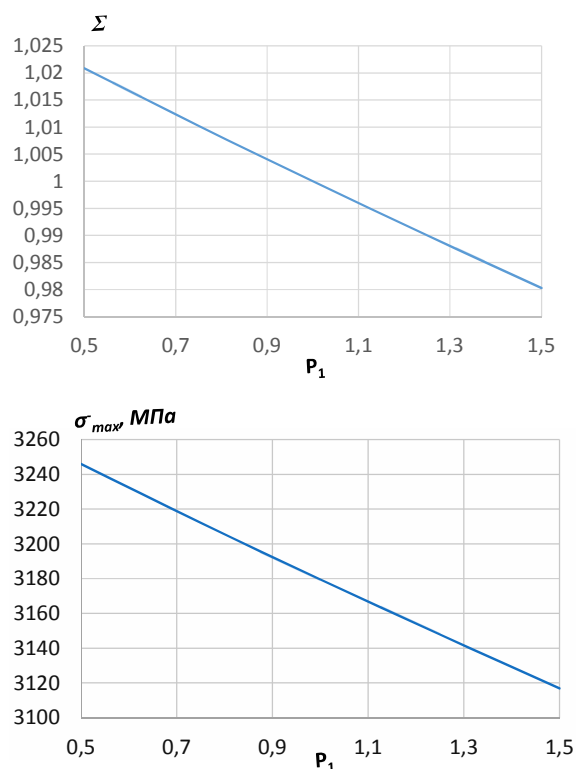


Рисунок 13 – Відносні та реальні максимальні еквівалентні напруження за Мізесом «сендвіч-бронепанелі» від p_1 та p_2 , віднесені до сталюї бронепанелі

Введена до розгляду «еквівалентна» бронепанель не повністю відповідає «сендвіч-бронепанелі» за всіма характеристиками та у повному діапазоні варіювання p_1, p_2 . Проте цю модель можна використати для пробних розрахунків тестових початкових варіантів бронекорпусів ЛБМ задля визначення тенденцій впливу варійованих параметрів на динамічний напружено-деформований стан бронекорпусів.

Аналіз напружено-деформованого стану власних частот і власних форм коливань тестового варіанту бронекорпусу БТР-80. Базуючись на аналізі здійснених досліджень тестових «сендвіч-бронепанелей», досліджено власні частоти і власні форми коливань тестової конструкції бронекорпусу ЛБМ. Бронекорпус відповідає за структурою і габаритами БТР-80 (рис. 14). Проте товщина бронепанелей у різних проєкціях – однакова і обрана довільно (умовно гомогенна панель – $6 \cdot 10^{-3}$ м – 6 мм). Розраховано напружено-деформований стан, спектри власних частот коливань і власних форм коливань такого «гомогенного», а також умовного «композиційного» бронекорпусів.

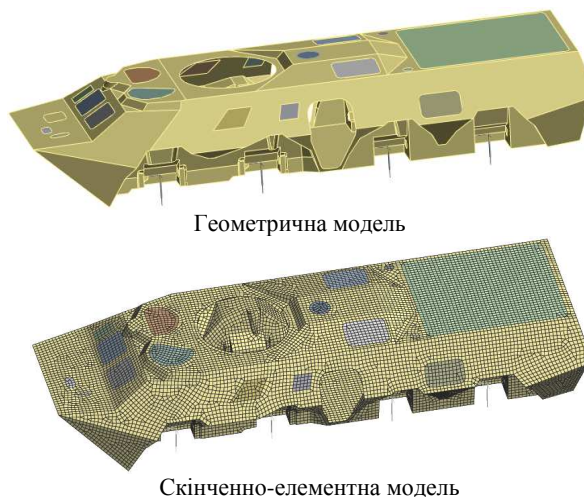


Рисунок 14 – Модель тестового варіанту бронекорпусу БТР-80 товщиною 9 мм

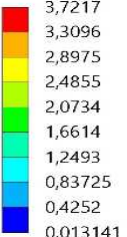
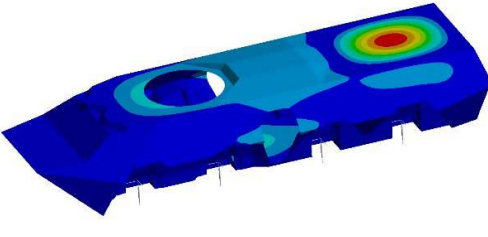
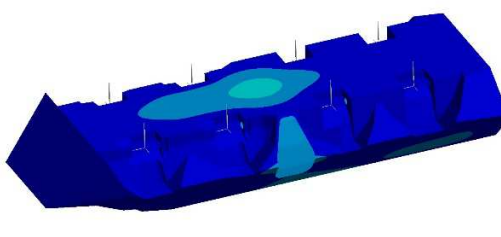
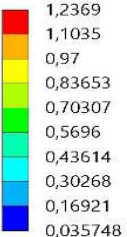
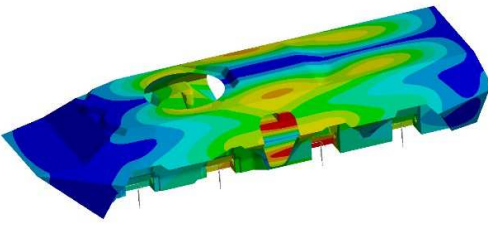
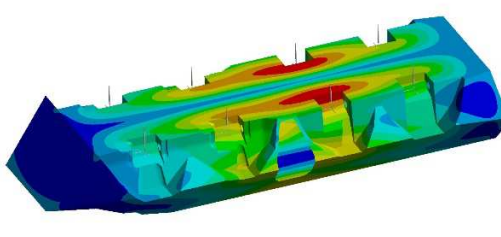
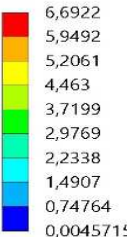
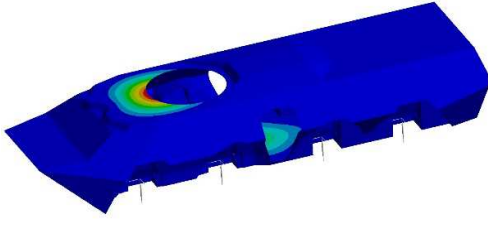
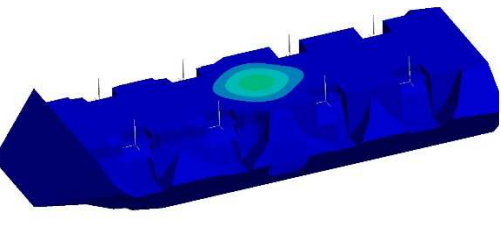
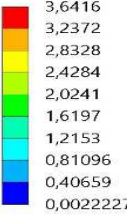
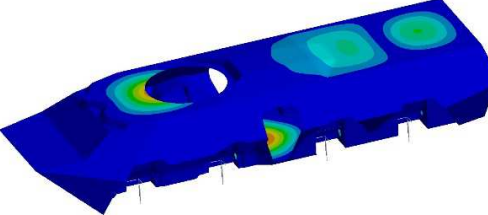
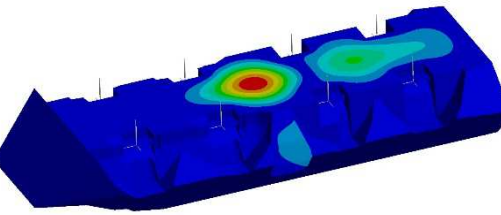
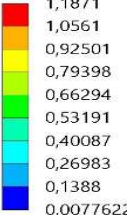
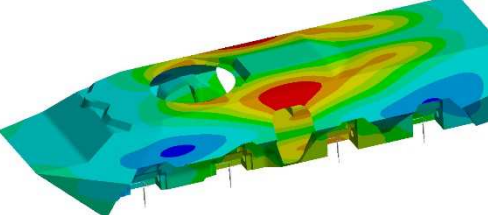
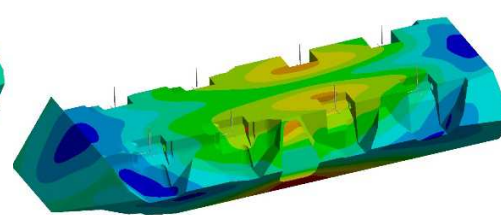
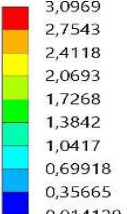
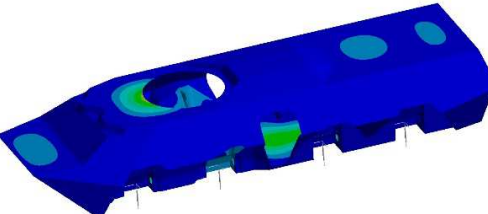
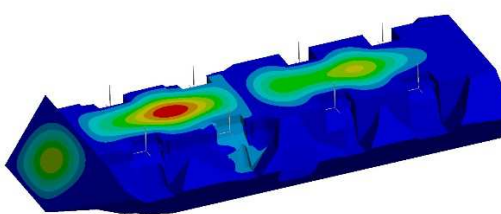
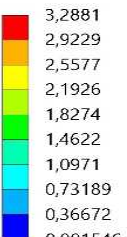
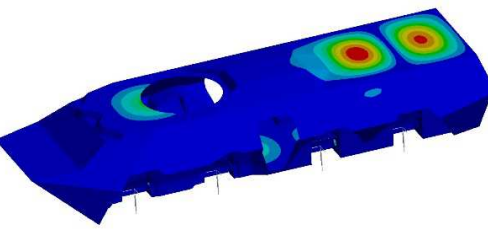
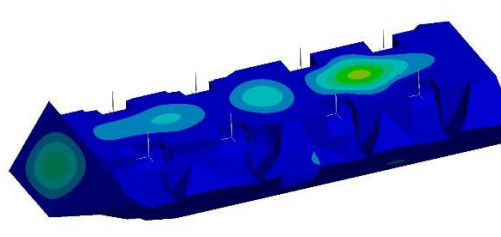
У табл. 1 наведені картини, властиві «гомогенному» корпусу, а у табл. 2 – те ж, але для «композиційного» бронекорпусу.

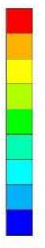
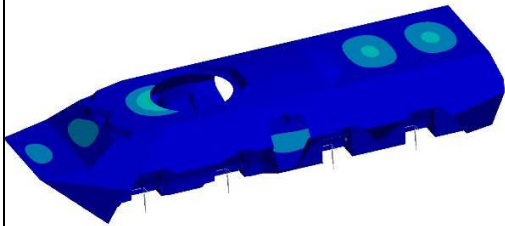
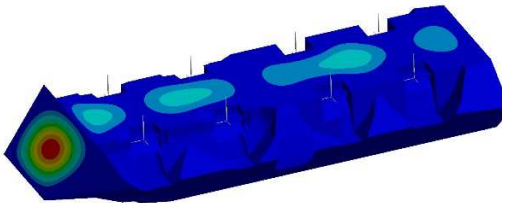
Як свідчить аналіз результатів аналізу напружено-деформованого стану, власних частот коливань і власних форм коливань двох варіантів тестових конструкцій ЛБМ, проміжний шар не чинить суттєвого впливу на динамічні, міцнісні та жорсткісні характеристики бронекорпусу. Відмінність цих характеристик не перевищує 5-20%.

Зрозуміло, що обрані для конструкції бронетранспортера результати носять наближений характер. Ці результати придатні для первинних оцінок на початкових етапах проєктних досліджень. Надалі потрібні більш точні моделі та удосконалені підходи.

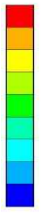
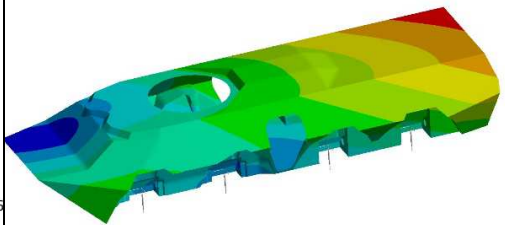
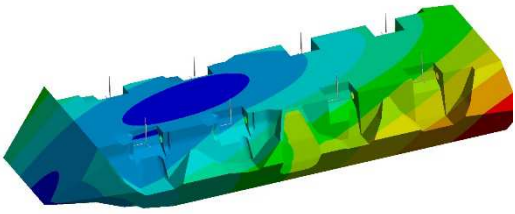
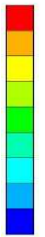
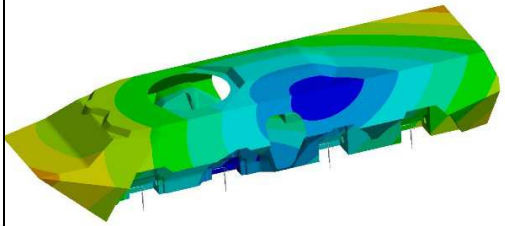
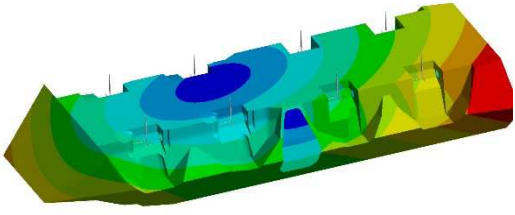
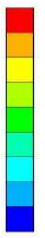
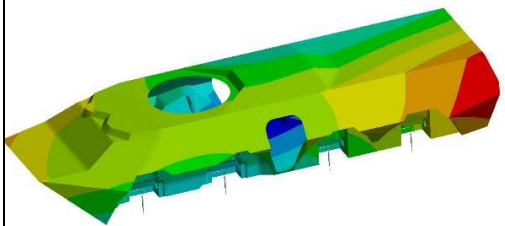
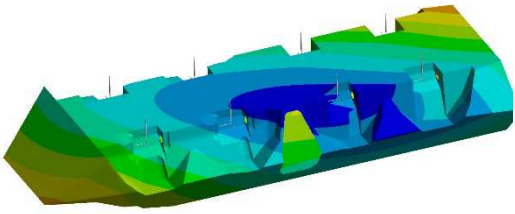
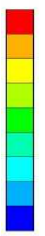
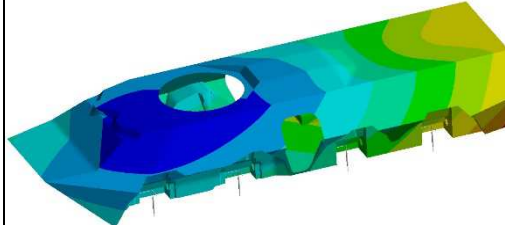
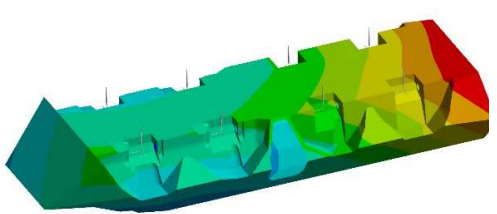
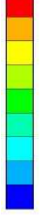
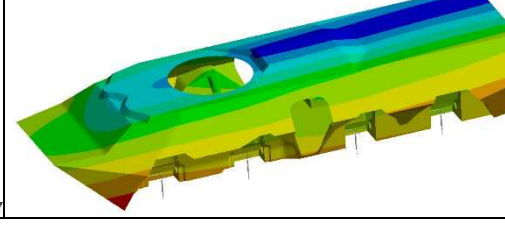
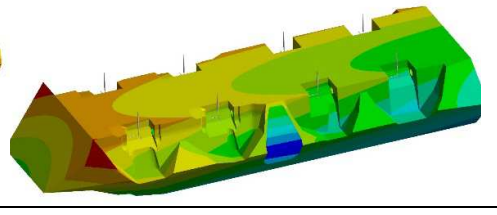
Таблиця 1 - Власна форма коливань при товщині корпусу 9 мм

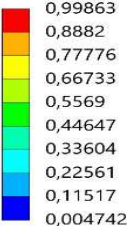
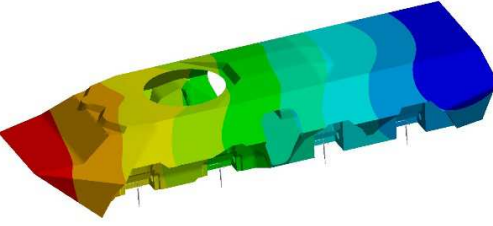
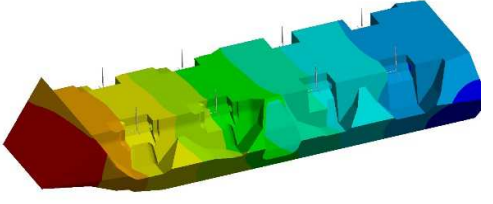
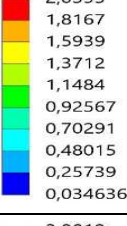
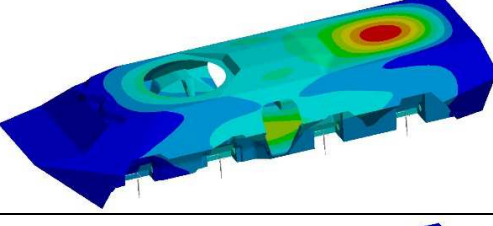
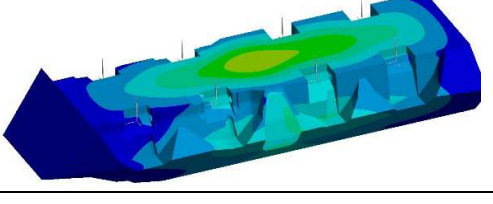
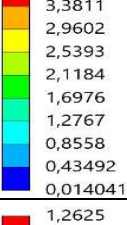
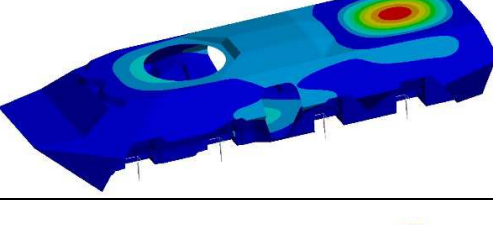
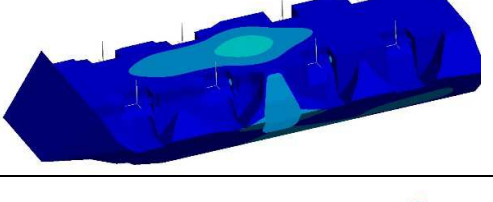
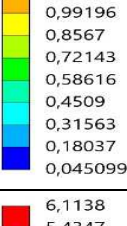
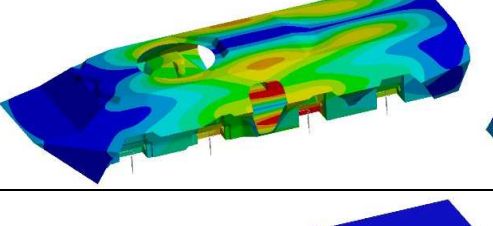
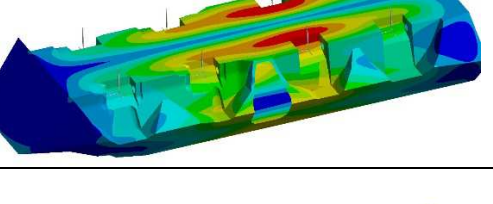
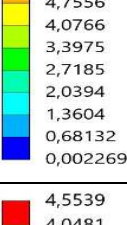
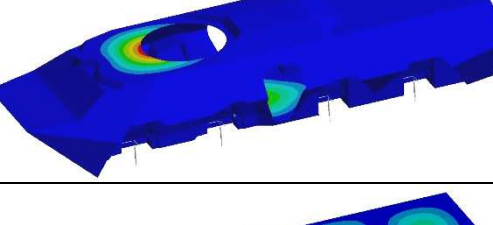
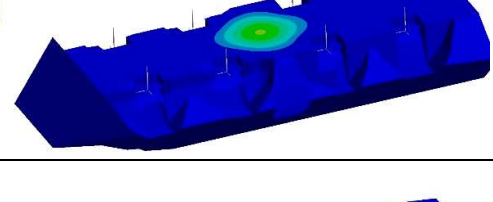
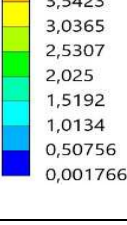
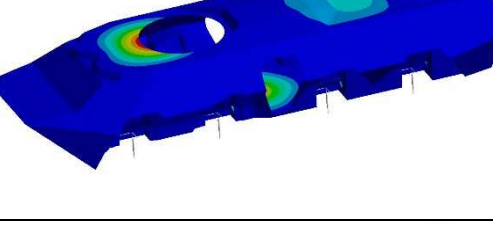
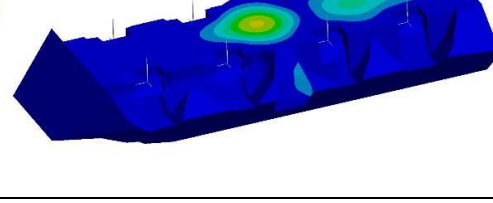
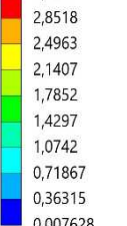
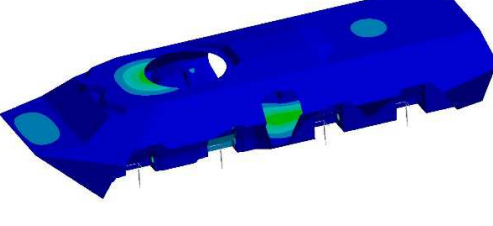
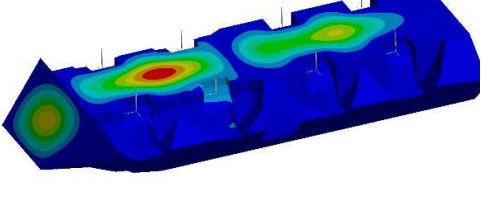
Власна форма	Значення	Власна форма коливань	
Перша (2,0855 Гц)	1,0429 0,92809 0,81323 0,69837 0,58351 0,46865 0,35379 0,23893 0,12407 0,009214		
Друга (2,4138 Гц)	1,007 0,89576 0,78453 0,6733 0,56207 0,45084 0,33961 0,22839 0,11716 0,0059308		
Третя (2,8815 Гц)	0,91576 0,82792 0,74008 0,65224 0,5644 0,47656 0,38872 0,30088 0,21304 0,1252		
Четверта (3,3504 Гц)	0,66548 0,63715 0,60882 0,58048 0,55215 0,52382 0,49549 0,46716 0,43883 0,4105		
П'ята (4,0482 Гц)	0,89109 0,79385 0,69661 0,59938 0,50214 0,4049 0,30767 0,21043 0,1132 0,015959		
Шоста (4,2482 Гц)	0,96783 0,86071 0,75359 0,64647 0,53935 0,43223 0,32511 0,21799 0,11087 0,0037544		
Сьома (13,016 Гц)	1,9027 1,695 1,4873 1,2796 1,0719 0,86422 0,65653 0,44884 0,24115 0,033458		

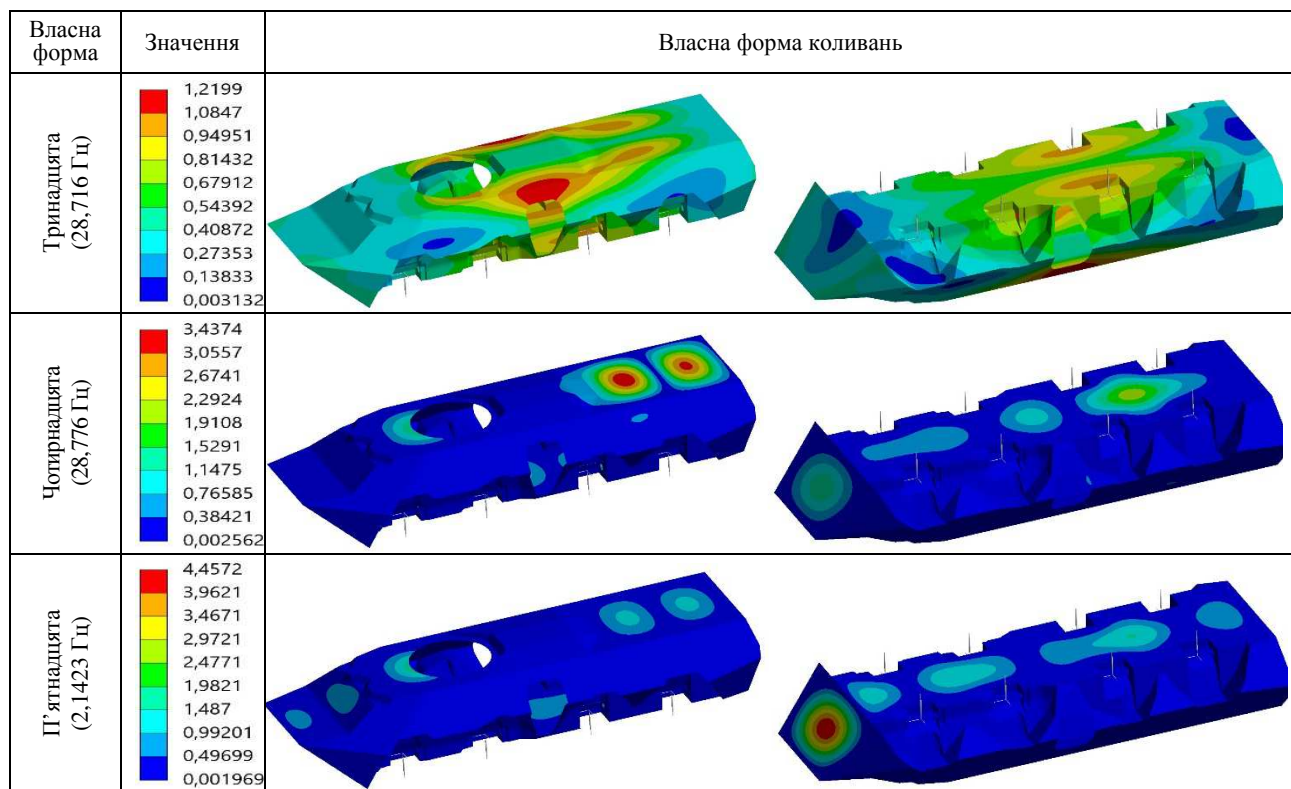
Власна форма	Значення	Власна форма коливань	
Восьма (18,603 Гц)			
Дев'ята (22,642 Гц)			
Десята (26,398 Гц)			
Одинадцята (26,736 Гц)			
Дванадцята (29,081 Гц)			
Тринадцята (29,615 Гц)			
Чотирнадцята (30,251 Гц)			

Власна форма	Значення	Власна форма коливань	
П'ятнадцята (32,425 Гц)	 4,436 3,9434 3,4507 2,9581 2,4655 1,9728 1,4802 0,98756 0,49492 0,002285		

Таблиця 2 - Власна форма коливань при «еквівалентній» товщині корпусу 8,5 мм

Власна форма	Значення	Власна форма коливань	
Перша (2,1423 Гц)	 1,0732 0,955 0,8368 0,71859 0,60039 0,48218 0,36397 0,24577 0,12756 0,009356		
Друга (2,4814 Гц)	 1,0358 0,92136 0,80696 0,69256 0,57816 0,46377 0,34937 0,23497 0,12057 0,006172		
Третя (2,9606 Гц)	 0,94535 0,85437 0,76339 0,67241 0,58143 0,49045 0,39947 0,30849 0,21751 0,12653		
Четверта (3,4451 Гц)	 0,68242 0,65371 0,62501 0,5963 0,5676 0,53889 0,51019 0,48148 0,45278 0,42407		
П'ята (4,1619 Гц)	 0,91385 0,81424 0,71463 0,61503 0,51542 0,41581 0,3162 0,21659 0,11699 0,017377		

Власна форма	Значення	Власна форма коливань	
Шоста (4,3608 Гц)	 0,99863 0,8882 0,77776 0,66733 0,5569 0,44647 0,33604 0,22561 0,11517 0,004742		
Сьома (12,612 Гц)	 2,0395 1,8167 1,5939 1,3712 1,1484 0,92567 0,70291 0,48015 0,25739 0,034636		
Восьма (17,684 Гц)	 3,8019 3,3811 2,9602 2,5393 2,1184 1,6976 1,2767 0,8558 0,43492 0,014041		
Дев'ята (21,831 Гц)	 1,2625 1,1272 0,99196 0,8567 0,72143 0,58616 0,4509 0,31563 0,18037 0,045099		
Десята (25,095 Гц)	 6,1138 5,4347 4,7556 4,0766 3,3975 2,7185 2,0394 1,3604 0,68132 0,002269		
Одинадцята (25,466 Гц)	 4,5539 4,0481 3,5423 3,0365 2,5307 2,025 1,5192 1,0134 0,50756 0,001766		
Дванадцята (28,279 Гц)	 3,2073 2,8518 2,4963 2,1407 1,7852 1,4297 1,0742 0,71867 0,36315 0,007628		



Аналіз результатів. Висновки.

1. У роботі задекларовано підхід до аналізу динамічного напружено-деформованого стану бронекорпусів легкоброньованих машин, який базується на послідовному використанні «еквівалентних» за характеристиками «гомогенних» моделей тестових панелей, а на другому – цілісної конструкції бронекорпуса. Це дає можливість визначити тенденції зміни динамічних, міцнісних та жорсткісних характеристик бронекорпусів задля прийняття помірно грубих, проте оперативних оцінок на перших етапах проєктних досліджень.

2. Установлено, що для дослідженого варіанту «сэндвіч-бронепанелей» властивості матеріалу проміжного шару, розташованого між шарами сталі (усі шари – однакової товщини), достатньо слабо впливають на динамічні, жорсткісні та міцнісні характеристики і окремих панелей, і конструкцій із них. Це дає можливість застосовувати апроксимації залежностей контрольованих характеристик від варійованих параметрів у вигляді поліномів низького порядку. Ця властивість є достатньо цінною на перших етапах проєктних досліджень.

3. Розвиток досліджень полягає у подальшому удосконаленні моделей досліджуваних елементів бронекорпусів шляхом залучення більш складних співвідношень, які описують поведінку композиційних структур.

Список літератури

1. Бісик С. П. Експериментальні дослідження вибухового навантаження макета корпусу бойової броньованої машини. *Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ»*, August 12,

2022; Zurich, Switzerland C. 78-83 DOI 10.36074/logos-12.08.2022.23

2. *Науково-технічні підходи до вирішення актуальних проблем розбудови сектору безпеки і оборони: кол. монографія* / І. Б. Чепков [та інші]. Одеса: Видавничий дім "Гельветика", 2021. 323 с. Чепков І. Б., Бісик С. П., Мironюк О. Ю., Сливінський О. А., Давидовський Л. С., Мironov Я. А. Актуальні проблеми протимінного та балістичного захисту бойових броньованих машин. С. 5-57.
3. Katok, O.A., Kravchuk, R.V., Kharchenko, V.V., Bisyk, S.P. (2020) Strength Assessment of Welded Joints of HighStrength Alloy Steels by Indentation Method. *Strength Mater.*, (5). 32-39. DOI.org/10.1007/s11223-020-00224-4
4. Bisyk S., Davydovskiy L., Hutov I., Slyvinskyi O., Aristarkhov O., Lilov I. (2019) Comparison of Numerical Methods for Modeling the Effect of Explosion on Protective Structures. *Trans & Motauto World*, (IV, No.1). 20-23
5. Bisyk S.P., Myronov Y.A., Davydovskiy L.S., Slyvinskyi O.A. (2021) Investigation Of The RPG Grenade Warhead Interaction With the Slat Armor. *The scientific heritage*. (1 (71)). 34-40. DOI: 10.24412/9215-0365-2021-71-1-34-40
6. Kurmach, M.M., Tsyryn, N.N., Eroshenko, A.V., Bisyk, S.P. (2021) Influence of the Structure of Hydrophobic Porous Silica Materials of SBA-15 Type and Polymethylsiloxane Derivatives on the Value of Water Intrusion Pressure. *Theor Exp Chem*. (57). 134-140. DOI.org/10.1007/s11237-021-09682-6
7. Bisyk S.P., Chepkov I.B., Vaskivskyy M.I., Davydovskiy L.S., Slyvinskyi O.A., Aristarkhov O.M. Methods for modelling Air blast on structures in LS-DYNA. Comparison and analysis. *Weapons and Military Equipment*, 2019. №1(21). 22-31. DOI: https://doi.org/10.34169/2414-0651.2019.1(21).22-31
8. Грабовський А. В., Васильєв А. Ю., Ткачук М. М., Волошина І. О., Льозний О. С., Ткачук М. А., Храмова І. Я., Кохановська О. В., Пелешко Є. В., Набоков А. В., Троценко В. В. Бронекорпуси вітчизняних бронетранспортерів: комп'ютерне та макетне моделювання динамічних властивостей. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Машинознавство та САПР. 2022. №. 1. С. 28-42. https://doi.org/10.20998/2079-0775.2022.1.03
9. Langdon G. S., Lee W. C., Louca L. A. The influence of material type on the response of plates to air-blast loading.

- International Journal of Impact Engineering*. 2015. T. 78. P. 150-160. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.12.008>
10. Mehreganian N., Fallah A., Boiger G., Louca L. Response of armour steel plates to localised air blast load—a dimensional analysis. *The International Journal of Multiphysics*. 2017. T. 11. №. 4. P. 387-412. DOI: <https://doi.org/10.21152/1750-9548.11.4.387>
 11. Godzimirski J., Janiszewski J., Roškowicz M., Surma Z. Ballistic resistance tests of multi-layer protective panels. *Eksplotacja I Niezawodność. Maintenance and Reliability*. 2015. v. 17 (3). P. 416-421. <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2015.3.12>
 12. Буря О. І., Набережна О. О., Калініченко С. В., Томіна А.-М. В. Перспективи використання полімерних композитних матеріалів у техніці сухопутних військ. Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: V міжн. наук.-практ. конф. 11–12 жовтня 2017 р. Тези доп.* Київ: ДНУ УкрІНТЕІ. 2017. С. 113-115.
 13. Wen Y., Xu C., Wang S., Batra R.C. Analysis of Behind the Armor Ballistic Trauma. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2015. v. 45. P. 11-21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.01.010>
 14. Баулін Д. С., Манжура С. А., Горєлишев С. А., Одейчук М. П., Ткачук М. А., Ткачук М. М. Методика проведення експериментальних досліджень балістичної стійкості багатопарових броньованих структур. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. 2018. № 25 (1301). С. 17-21. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2018.25.04>
 15. Ткачук М. А., Бурлаєнко В. М., Грабовський А. В., Ткачук М. М., Троценко В. В., Назаренко С. О., Набоков А. В., Серіков В. І., Зінченко О. І., Вейлер В. С. Динаміка елементів бойових броньованих машин, виготовлених зі зміцнених матеріалів. *Механіка та машинобудування*. 2023. №2. С. 84-127.
 16. Birman V., Kardomateas G.A. Review of current trends in research and applications of sandwich structures. *Composites Part B: Engineering*. 2018. 142. P. 221-240. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.027>
 17. Burlayenko, V. N., Sadowski, T., & Altenbach, H. (2021). Efficient free vibration analysis of FGM sandwich flat panels with conventional shell elements. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 29(25), 3709–3726. <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1909191>
 18. Burlayenko, V.N., Kouhia, R. Analysis of Natural Frequencies in Non-uniform Cross-section Functionally Graded Porous Beams. *J. Vib. Eng. Technol.* 12, 6527–6547 (2024). <https://doi.org/10.1007/s42417-023-01268-x>
 19. Helong Wu, Jie Yang, Sritawat Kitipornchai. Mechanical Analysis of Functionally Graded Porous Structures: A Review. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2020 20:13. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0219455420410151>
 20. Huang B, Zhao G, Ren S, Chen W, Han W (2023) Higher-order model with interlaminar stress continuity for multi-directional FG-GRC porous multilayer panels resting on elastic foundation. *Engineering Structures* 286:116074 <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116074>
 21. Najibi, A., Kianifar, M., Ghazifard, P. Three-dimensional natural frequency investigation of bidirectional FG truncated thick hollow cone. *Engineering Computations*. 2023. Vol. 40, No. 1, pp. 100-125. <https://doi.org/10.1108/EC-05-2022-0377>
 22. Burlayenko, V.N., Kouhia, R. & Dimitrova, S.D. One-Dimensional vs. Three-Dimensional Models in Free Vibration Analysis of Axially Functionally Graded Beams with Non-Uniform Cross-Sections. *Mech Compos Mater* 60, 83–102 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11029-024-10176-4>
 23. Ткачук М.А., Грабовський А.В., Набоков А.В., Мазур І.В., Рикунів О.М. Залежність динамічних характеристик броньованих структур від варіювання параметрів. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: Сухопутних військ. Збірник тез доповідей Міжн. наук.-техн. конф. 11–12 жовтня 2017 р. Тези доп.* Київ: ДНУ УкрІНТЕІ. 2017. С. 113-115.
 - 12.08.2022.23
 2. *Naukovo-tehnichni pidkhydy do vyrishennya aktual'nykh problem rozbudovy sektoru bezpeky i oborony : kol. monohrafiya* [Scientific and technical approaches to solving current problems of developing the security and defense sector] / I. B. Chepkov [ta in.]. Odesa: Gelvetika Publ. 2021. 323 p. Chepkov I. B., Bisyk S. P., Myronov Ya. A. Aktual'ni problemy proty minnogo ta balistychnogo zaxystu bojo-vy'x bron'ovany'x mashyn. P. 5-57.
 3. Katok, O.A., Kravchuk, R.V., Kharchenko, V.V., Bisyk, S.P. (2020) Strength Assessment of Welded Joints of HighStrength Alloy Steels by Indentation Method. *Strength Mater*, (5). 32-39. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00224-4>
 4. Bisyk S., Davydovskiy L., Hutov I., Slyvinskyy O., Aristarkhov O., Lilov I. (2019) Comparison of Numerical Methods for Modeling the Effect of Explosion on Protective Structures. *Trans & Motauto World*, (IV, No.1). 20-23
 5. Bisyk S.P., Myronov Y.A., Davydovskiy L.S., Slyvinskyy O.A. (2021) Investigation Of The RPG Grenade Warhead Interaction With the Slat Armor. *The scientific heritage*. (1 (71)). 34-40. DOI: <https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-71-1-34-40>
 6. Kurmach, M.M., Tsyryn, N.N., Eroshenko, A.V., Bisyk, S.P. (2021) Influence of the Structure of Hydrophobic Porous Silica Materials of SBA-15 Type and Polymethylsiloxane Derivatives on the Value of Water Intrusion Pressure. *Theor Exp Chem*. (57). 134–140. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11237-021-09682-6>
 7. Bisyk S.P., Chepkov I.B., Vaskivskyy M.I., Davydovskiy L.S., Slyvinskyy O.A., Aristarkhov O.M. Methods for modelling Air blast on structures in LS-DYNA. *Comparison and analysis. Weapons and Military Equipment*, 2019. №1(21). 22-31. DOI: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2019.1\(21\).22-31](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2019.1(21).22-31)
 8. Grabovskiy A. V., Vasylyev A. Yu., Tkachuk M. M., Voloshyn I. O., L'oznyy O. S., Tkachuk M. A., Xramczova I. Ya., Koxanovskaya O. V., Peleshko Ye. V., Nabokov A. V., Trocenko V. V. Bronekorpusy vitchy'nyy'x bronetransporteriv: komp'yuternye ta maketne modelyuvannya dy'namichny'x vlasty'vostej. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*. No. 1. P. 28-42. <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2022.1.03>
 9. Langdon G. S., Lee W. C., Louca L. A. The influence of material type on the response of plates to air-blast loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2015. T. 78. P. 150-160. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.12.008>
 10. Mehreganian N., Fallah A., Boiger G., Louca L. Response of armour steel plates to localised air blast load—a dimensional analysis. *The International Journal of Multiphysics*. 2017. T. 11. №. 4. P. 387-412. DOI: <https://doi.org/10.21152/1750-9548.11.4.387>
 11. Godzimirski J., Janiszewski J., Roškowicz M., Surma Z. Ballistic resistance tests of multi-layer protective panels. *Eksplotacja I Niezawodność. Maintenance and Reliability*. 2015. v. 17 (3). P. 416-421. <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2015.3.12>
 12. Буря О. І., Набережна О. О., Калініченко С. В., Томіна А.-М. В. Перспективи використання полімерних композитних матеріалів у техніці сухопутних військ. Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: V міжн. наук.-практ. конф. 11–12 жовтня 2017 р. Тези доп.* Київ: ДНУ УкрІНТЕІ. 2017. С. 113-115.
 13. Wen Y., Xu C., Wang S., Batra R.C. Analysis of Behind the Armor Ballistic Trauma. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2015. v. 45. P. 11-21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.01.010>
 14. Baulin D. S., Manzhura S. A., Goryelyshev S. A., Odejchuk M. P., Tkachuk M. A., Tkachuk M. M. Metody'ka provedennya eksperymental'ny'x doslidzhen' balistychnoyi stijkosti bagatosharovy'x bron'ovany'x struktur. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*. 2018. No. 25 (1301). P. 17-21. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2018.25.04>
 15. Tkachuk M. A., Burlayenko V. M., Grabovskiy A. V., Tkachuk M. M., Trocenko V. V., Nazarenko S. O., Nabokov A. V., Syrykov V. I., Zinchenko O. I., Vejler V. S. Dy'namika elementiv bojovoyi bron'ovany' mashyn, vy'gotovleny'x zi zmichneny'x materialiv. *Mexanika ta Mashyno buduvannya*. 2023. No.2. P. 84-127.

References (transliterated)

1. Bisyk S. P. Eksperymental'ni doslidzhennya vy'buxovogo navanta-zhennya maketa korpusu bojovoyi bron'ovany' mashyn. *Collection of scientific papers «AOΓOΣ»*. August 12, 2022; Zurich, Switzerland C. 78-83 DOI 10.36074/logos-

16. Birman V., Kardomateas G.A. Review of current trends in research and applications of sandwich structures. *Composites Part B: Engineering*. 2018. 142. P. 221-240. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.027>
17. Burlayenko, V. N., Sadowski, T., & Altenbach, H. (2021). Efficient free vibration analysis of FGM sandwich flat panels with conventional shell elements. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 29(25), 3709–3726. <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1909191>
18. Burlayenko, V.N., Kouhia, R. Analysis of Natural Frequencies in Non-uniform Cross-section Functionally Graded Porous Beams. *J. Vib. Eng. Technol.* 12, 6527–6547 (2024). <https://doi.org/10.1007/s42417-023-01268-x>
19. Helong Wu, Jie Yang, Sritawat Kitipornchai. Mechanical Analysis of Functionally Graded Porous Structures: A Review. *International Journal of Structural Stability and Dynamics* 2020 20:13. DOI:10.1142/S0219455420410151
20. Huang B, Zhao G, Ren S, Chen W, Han W (2023) Higher-order model with interlaminar stress continuity for multi-directional FG-GRC porous multilayer panels resting on elastic foundation. *Engineering Structures* 286:116074 <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116074>
21. Najibi, A., Kianifar, M., Ghazifard, P. Three-dimensional natural frequency investigation of bidirectional FG truncated thick hollow cone. *Engineering Computations*. 2023. Vol. 40, No. 1, pp. 100-125. <https://doi.org/10.1108/EC-05-2022-0377>
22. Burlayenko, V.N., Kouhia, R. & Dimitrova, S.D. One-Dimensional vs. Three-Dimensional Models in Free Vibration Analysis of Axially Functionally Graded Beams with Non-Uniform Cross-Sections. *Mech Compos Mater* 60, 83–102 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11029-024-10176-4>
23. Tkachuk M.A., Grabovs'kyj A.V., Nabokov A.V., Mazur I.V., Rykunov O.M. Zalezhnist' dy namichny'x karakterystyk bronekorpusiv vid varijovany'x parametriv. Perspektivy rozvytku ozbroynnya ta vijs'kovoyi tekhniky Suxoputny'x vijs'k. Zbirnyk tez dopovidej Mizhn. nauk.-texn. konf. (L'viv, traven' 2015 r.). L'viv: ASV, 2015. P. 57-58.

Надійшла (received) 31.01.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Грабовський Андрій Володимирович / Grabovskiy Andrey – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6116-0572>; тел.: (057)7076166, e-mail: andrej8383@gmail.com

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

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

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

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

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.: (093)829-70-05; e-mail: vvoova1102@ukr.net

Набоків Анатолій Володимирович / Nabokov Anatoly – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; e-mail: tma@tmm-sapr.org

Соловей Вадим / Solovei Vadim – Начальник служби безпілотних систем Східного ОТО, м. Харків, Україна; e-mail: tma@tmm-sapr.org

Богач Андрій Станиславович / 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

Рікунов Олег Миколайович / Rikunov Oleh – кандидат технічних наук, Національна академія Національної гвардії України, доцент кафедри «Технічного та тилового забезпечення», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7581-7531>; e-mail: rikunov317@ukr.net

Малакей Сергій Андрійович / Malakei Serhii – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; e-mail: tma@tmm-sapr.org