

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

ВПЛИВ УДАРНОЇ ХВИЛІ НА ВТРАТУ СТІЙКОСТІ БРОНЕКОРПУСІВ ЛЕГКОБРОНЬОВАНИХ МАШИН

У роботі основна увага приділяється забезпеченню стійкості бронекорпусів легкоброньованих машин на дію зовнішнього тиску. Джерелом цього тиску є різні типи фугасних боеприпасів. На прикладі тестової конструкції бронекорпусу розроблено математичну та чисельну моделі втрати стійкості конструкції під дією зовнішнього тиску. Для розв'язання задачі аналізу втрати стійкості залучено метод скінченних елементів. Для забезпечення автоматизованого варіативного аналізу втрати стійкості розроблені параметричні моделі бронекорпусів. Варійованими узагальненими параметрами є тип і загальна компоновка бронекорпусу, карта товщин бронепанелей у різних проекціях. Також варійованими параметрами є сортамент, схема розміщення та товщини елементів внутрішньої силової структури бронекорпусу. На прикладі тестової конструкції визначено вплив товщин бронепанелей на критичний рівень надлишкового тиску, за якого відбувається втрата стійкості. Наведені форми втрати стійкості бронекорпусу. Розроблений програмно-моделний комплекс дає можливість обґрунтувати прогресивні технічні рішення бронекорпусів за критерієм збереження стійкості при дії ударної хвилі.

Ключові слова: бронекорпус; ударна хвиля; втрата стійкості; метод скінченних елементів; внутрішня силова структура; бронепанель

**М. А. TKACHUK, A. GRABOVSKIY, M. M. TKACHUK, A. VASILIEV, A. NABOKOV, V. TROTSSENKO,
V. SOLOVEY, S. MALAKEY, A. BOHACH**

INFLUENCE OF SHOCK WAVE ON STABILITY LOSS OF LIGHTLY ARMORED VEHICLES ARMORED HULLS

This work pays main attention to ensuring the stability of lightly armored vehicles armored hulls to the action of external pressure. The source of this pressure is various types of high-explosive ammunition. Using the example of test design of armored hull, the mathematical and numerical model of structural stability loss under the action of external pressure has been developed. The finite element method has been used to solve the problem of analyzing the stability loss. To ensure automated variational analysis of stability loss, parametric models of armored hulls have been developed. The variable generalized parameters are: the type and general layout of armored hull, the map of armored panels thicknesses in different projections. In addition, the variable parameters are the assortment, layout and thickness of elements of the internal power structure of the armored hull. Using the example of a test design, the influence of the thickness of armored panels on the critical level of excess pressure at which the stability loss occurs is determined. The forms of the loss of stability of the armored hull are given. The developed software and modeling complex makes it possible to substantiate progressive technical solutions for armored hulls based on the criterion of maintaining stability under the action of a shock wave.

Keywords: armored hull, shock wave, stability loss, finite element method, internal power structure; armored panel

Вступ. Сучасні бойові дії виявили цілу низку проблем, які постали перед бронетанкобудуванням. Вони полягають у тому, що традиційні технічні рішення перестали відповідати вимогам, що склалися. Справа тут не тільки у кількісному зростанні характеристик дії чинників ураження. Більш чутливим є розширення множини цих чинників ураження (дронове ураження, кумулятивні боеприпаси, фугасні боеприпаси підвищеної потужності тощо). Відповідно, це змушує розробників реагувати на цю зміну. Отже, у розрахункових моделях слід враховувати нові процеси і стани, які породжені цими новими чинниками. Зокрема, це дія ударної хвилі (УХ) на легкоброньовані машини (ЛБМ). Ще одна особливість – взаємовплив та взаємозв'язок технічних рішень. Окрім того, це взаємовплив станів за різними чинниками. Таким чином, потрібна єдина методологічна база для прийняття рішень за зазначеними критеріями. На це спрямована ця стаття.

Аналіз методів дослідження стійкості, міцності та захищеності бронекорпусів легкоброньованих машин. При проектуванні легкоброньованих машин першочергова увага приділяється проблемам забезпечення захищеності. У першу чергу це стосується технічних рішень бронекорпусів, які є основним силовим, компоновальним та захисним елементом ЛБМ.

Різним аспектам цієї проблеми приділяється увага у багатьох роботах [1–6]. Зокрема, мова йде про стійкість до дії фугасних боеприпасів та ударної хвилі, про балістичну та протимінну стійкість.

Практичний досвід випробувань захищеності бойових броньованих машин (ББМ) показує, що забезпечення якісного виготовлення зварних бронекорпусів є суттєвою запорукою забезпечення й захищеності. З цією метою роботах [1–6] проведено оцінку та систематизацію основних причин, що призводять до виникнення дефектів у зварних корпусах ББМ легкої категорії за масою та визначення основних напрямів їх попередження для уникнення зростання імовірності загибелі екіпажу ББМ.

Так, у [1] зазначається, що основними загрозами для об'єктів військової техніки є дві протилежні, як за технічним рівнем, так і за способом 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 [1].

Концепція побудови системи пасивного протимінного захисту ББМ має ґрунтуватись на передбаченні в його конструкції можливості встановлення додаткових захисних структур, для поетапного підвищення рівня протимінної стійкості відповідно існуючим загрозам, типу та завданням, що виконуються роботі [1].

У роботі [1] розроблена чисельна модель для дослідження пробиття ударниками з різною фор-

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

мою головної частини гомогенних перешкод.

Застосування методу SPH (3D підхід) є більш прийнятним для дослідження захисних елементів бойових броньованих машин від бронебійних засобів ураження кінетичної дії [1].

Щоб оцінити адекватність математичної моделі вибухового навантаження і можливості моделювання в ній процесів відбиття, а також оцінити конструкції зі складною геометрією, у роботі [3] проведено експериментальні дослідження з перевірки адекватності і точності розробленої математичної моделі вибухового навантаження з урахуванням нестационарного відбиття УХ та перевірки окремих залежностей, отриманих із використанням чисельного моделювання.

Дослідженню у роботі [3] підлягали захисні протитинні екрани (ЗПМЕ), встановлені на макет корпусу бойової броньованої машини.

Отримані результати показують, що для умов підриву заряду під днищем або шасі, описані у статті [4] методи моделювання впливу вибуху мають високу адекватність і точність. Використання кожного методу доцільне з огляду на його недоліки та переваги на розсуд дослідника. Враховуючи досвід авторів Bisyk S., Davydovsky L., Hutov I., Slyvinskyi O., Aristarkhov O., Lilov I., дослідження захисної конструкції на початкових етапах доцільно проводити методами `LOAD_BLAST` та `LOAD_BLAST_ENHANCED`. Щоб отримати більш детальну інформацію про захисну структуру, слід використовувати один із методів, таких як метод Лагранжа-Ейлера, метод корпускулярних частинок, гідродинаміка гладких частинок [4].

У роботі [5] виконано моделювання проникнення бронебійної кулі Б-32 калібру 12,7 мм у двох шарову кераміко-композитну броню для бронеблоків двох конструкцій. Перший є шаром керамічної квадратної плитки, що підтримується склом або поліамідною тканиною. Моделювання та наступні балістичні випробування показали, що утворюється конічна тріщина Герца, локалізована в керамічній плитці. Плитка руйнується від поширення радіальних тріщин, і весь блок броні стає нездатним витримати повторне попадання кулі. У другому випадку бронеблок складається із дискретних циліндричних керамічних елементів, наповнених епоксидною смолою, зі сферичними кінцями. Перевага цього – це локалізація зони ураження і, таким чином, здатність витримувати численні кульові влучення. Балістичні випробування порівнюваних бронеблоків показали, що обидва забезпечують ефективний додатковий захист легкоброньованої техніки від звичайного удару кулі калібру 12,7 мм [5].

У роботі [6] представлено результати моделювання дії вибуху на металеву пластину з використанням різних розрахункових методів: `LOAD_BLAST`; `LOAD_BLAST_ENHANCED`; Arbitrary Lagrangian Eulerian; Particle Blast Method; Smooth Particle Hydrodynamics, що реалізовані в програмі LS-DYNA. Оцінена адекватність та точність цих методів в залежності від коефіцієнту відстані до вибухової речовини. Наведенні переваги й недоліки кожного методу та рекомендації по їх

застосуванню за результатами цього моделювання та досвіду авторів [6].

З огляду на актуальність проблеми аналізу стійкості конструкцій до дії силового навантаження цей напрямок досліджень склав зміст багатьох робіт [7–20].

Зокрема, у роботах [7–20] мова йде про стійкість структур різного типу до дії зовнішніх навантажень.

Так, на основі припущень Кірхгофа-Лава у роботі [8] встановлено рівняння оболонки з неідеальними граничними умовами для опису деформації тонкостінної панелі літака в результаті зміни позиціонування та сили затиску в процесі складання. Оболонкові рівняння спрощуються теорією функцій комплексної змінної, а також аналітичні розв'язки представлені підходом рядів Фур'є та методом Галеркіна. Тим часом, потенційні функції вводяться для розрахунку окремого розв'язку, що успішно дозволяє уникнути використання спеціалізованих функцій переміщення з різними типами навантажень. Модель перетворення координат також розроблена для перетворення фактичного обмеження межі переміщення та обертання в декартовій системі координат у неідеальну межу в криволінійній системі координат. Аналітичний розрахунок, моделювання скінчених елементів та експеримент у реальному застосуванні були виконані з урахуванням просто підтримуваних, ідеальних граничних та неідеальних граничних умов відповідно. Результати показали хороші показники точності представлено-го розв'язку [8].

Мета статті [9] полягає в тому, щоб висвітлити перспективні методи в поточній практиці проектування тонких металевих конструкцій та визначити структуру майбутніх потреб. Незважаючи на значні інвестиції в дослідження, все ще ведуться широкі дискусії щодо проектування конструкційних елементів із тонкою оболонкою. Типи відмов складні та чутливі до початкових геометричних недоліків. Типи навантажень дуже різноманітні, включаючи осьове, зсувне, згинальне в поєднанні з внутрішнім або зовнішнім тиском, що робить методи, засновані на розрахунках, складними. Геометрія конструкцій включає поздовжні та поперечні ребра жорсткості та конічні, звужені вздовж елементи, що ускладнює складність. У статті [9] синтезовано ці поточні підходи та перспективні ідеї для майбутніх досліджень. Особливу увагу приділено необхідним дослідженням розширення поточних можливостей GMNIA (геометрично та матеріально нелінійний аналіз з урахуванням недоліків).

У дослідженні [10] представлено єдине загальне формулювання для аналізу різних оболонокоподібних структур. Запропонована модель є комплексною, і на її основі можна використовувати різноманітні теорії. Поперечний переріз структури оболонки можна довільно аналізувати за допомогою представлених рівнянь. Іншими словами, різні типи оболонок, включаючи циліндричні, конічні, сферичні, еліптичні, гіперболічні, параболічні та будь-які негеометричні структури з функціональним поперечним перерізом, можна змоделювати механічно

за допомогою лише однієї системи рівнянь у частинних похідних. Отримані рівняння розв'язані методом напіваналітичного розв'язування SAPM. Для того, щоб представити комплексне дослідження, розглядається динамічний нелінійний аналіз. Зміна властивостей матеріалу по товщині була прийнята як функціонально градуїрована. Було досліджено її вплив на міцність конструкції оболонки з функціональним поперечним перерізом. Досліджено у роботі [10] різні типи конструкцій за формою та властивостями поперечного перерізу. Нарешті, вплив деяких важливих факторів на результати, таких як граничні умови, нелінійний аналіз, динамічний аналіз і обертання конструкції навколо її центральної осі, було проведено у роботі [10]. Це дослідження та його оригінальні керівні рівняння можна розглядати як повний довідник для механічного аналізу різних конструкцій оболонки з функціональною формою поперечного перерізу.

У роботі [14] представлено детальний огляд поведінки вигнутих панелей, що піддаються одноосовим напруженням стиску, окружним напруженням, напруженням зсуву та комбінованим напруженням стиску в площині, а потім порівняно проєктні положення стандартів DNV і DNVGL з чисельними результатами FEM, отриманими авторами.

У статті [16] оцінено шкідливий вплив перфорацій на стійкість до вигину перфорованих гарячекатаних сталевих L-подібних елементів під час стиснення. Числові моделі FEM використовуються для проведення аналізу витримки та нелінійного аналізу з метою виявлення як критичного, так і розривного навантаження досліджуваних елементів у випадку одного або кількох отворів. Отримані результати показують, що, незважаючи на те, що критичне навантаження не сильно залежить від наявності отворів, несуча здатність, коли елементи характеризуються середньою або низькою стрункістю, може бути значно зменшена, якщо свердління загальних розмірів застосовуються на одній із двох стійок секцій, що означає, що поточні методи, надані кодексами, не є повністю консервативними. Як наслідок, конкретні криві стійкості визначаються та пропонуються як корисна альтернативна процедура проєктування у роботі [16].

У статті [17] запропоновано правила проєктування для оцінки здатності до вигину, зсуву та взаємодії MV коробчасто-балкових мостових настилів із криволінійним нижнім фланцем. Дві аналітичні розрахункові моделі для визначення опору на вигин і зсув використовують формат EC3 для прямих нижніх фланців, але вони адаптовані для врахування наявності посиленої вигнутої панелі в нижньому фланці.

У роботі [18] запропоновано методичні рекомендації для розрахунку граничного опору поздовжньо посиленних, поперечно вигнутих пластин, що піддаються рівномірному стиску. Вони є внутрішніми пластинчастими елементами коробчатих балок. Запропонований метод відповідає нормам Єврокоду та дотримується концепції ефективної ширини з EN 1993-1-5. Останній сильно знижує

опір жорстких, вигнутих пластин. Таким чином, новий метод у роботі [18] розширює сферу застосування поточних європейських стандартів від плоских до вигнутих пластин.

У роботі [19] представлені та обговорюються результати пружної геометрично нелінійної узагальненої теорії балок (GBT) для циліндричних сталевих панелей з простою опорою під напруженням вигину в площині. Завдяки властивій модальній природі GBT дозволяє отримати глибокі знання про поведінку цих складних структурних елементів, які неможливо отримати за допомогою стандартного аналізу скінчених елементів оболонки.

У роботі [20] виконано обширне чисельне дослідження з метою аналізу поведінки циліндричних вигнутих сталевих панелей із простою опорою після вигину, які піддаються чистому зсувному навантаженню. Основна мета полягає в тому, щоб зрозуміти вплив геометричних параметрів, таких як кривизна та співвідношення сторін, але також вона спрямована на вивчення того, як рівень обмеження країв впливає на кінцевий опір зсуву.

Аналіз розробок та досліджень, описаних у оглянутих роботах [1–20], дає підстави про те, що натеper проблема підвищення стійкості, зокрема, бронекопсусів ЛБМ, до дії чинників ураження (зокрема, до дії УХ) не отримала повного вирішення. Незважаючи на високу актуальність та важливість, обсяг досліджень у цьому напрямку недостатній. Окрім іншого, це викликано тим, що потребують розвитку та адаптації для розв'язання подібних задач моделі та методи досліджень, які були би спроможні ефективно здійснювати аналіз відповідних процесів, станів і характеристик.

Слід також зазначити, що певні напрацювання у цьому напрямку, викладені у роботах [21, 22], надають можливість при певних доопрацюваннях створювати достатньо ефективний інструмент досліджень. Проте доцільно здійснювати розвиток цього підходу.

Мета роботи – розвиток та адаптація методу узагальненого параметричного моделювання із метою багатоваріантного аналізу стійкості бронекопсусів легкоброньованих машин на дію зовнішнього тиску від ударної хвилі.

Моделі та методи досліджень стійкості бронекопсусів легкоброньованих машин при дії надлишкового тиску від ударної хвилі. Проблема визначення стійкості бронекопсусів легкоброньованих машин при дії ударної хвилі, попри достатньо розроблений математичний апарат і чисельні методи (у першу чергу – метод скінчених елементів) для подібного типу задач, стикається із двома труднощами.

Перша пов'язана зі специфікою конструкції бронекопсусів як просторових зварних конструкцій, які об'єднують бронепанелі та елементи внутрішньої силової структури. Дійсно, ці конструкції відрізняються від інших подібних просторових пластинчасто-оболонково-стержневих конструкцій. Це стосується і структури та геометричної форми, і властивостей матеріалів, із яких виготовлені бронекопсуси. Окрім того, самі критерії, за якими проєк-

туються звичайні цивільні конструкції, з одного боку, та бронекорпуси, – з іншого, принципово відрізняються. Та й зовнішні навантаження, що діють на ці два згаданих класи конструкцій, різко відмінні. Отже, потрібен підхід, який враховує специфіку досліджуваних бронекорпусів.

Другі труднощі пов'язані із тим, що на перших етапах проектування, на яких, власне, вкрай необхідні результати подібних досліджень, сама структура конструкцій бронекорпусу, розміри та матеріали для його виготовлення, є мінливими, невизначеними, варіюваними. У цьому полягає природа технічних рішень, на які впливає ціла множина міркувань та критеріїв. Серед цих джерел інформації для прийняття тих чи інших технічних рішень якраз і необхідні дані розрахункових досліджень, у т. ч. – на стійкість від дії УХ. Таким чином, окрім урахування специфіки досліджуваних конструкцій бронекорпусів, підхід, що розробляється, має враховувати ще й мінливість та варіативність їхніх поточних рішень.

Для розв'язку поставленої задачі із урахуванням зазначених вище вимог запропоновано підхід, який об'єднує, з одного боку, метод скінченних елементів, а з іншого, – метод узагальненого параметричного моделювання.

Адаптація методу узагальненого параметричного моделювання полягає в тому, що досліджуваний клас бронекорпусів ідентифікується набором узагальнених параметрів $P = U p_i$. Під цими параметрами p_i мається на увазі спосіб ідентифікації того чи іншого конкретного варіанту бронекорпусу (компоновка, структура, товщини елементів тощо). На основі досвіду створюється такий масив P , що дає можливість однозначно ідентифікувати об'єкт, а також безконфліктно та узгоджено цей об'єкт варіювати.

Адаптація методу скінченних елементів полягає в тому, що у розв'язувальну систему рівнянь вбудовується залежність усіх компонентів від набору узагальнених параметрів. Так, для аналізу стійкості бронекорпусів ЛБМ формується система рівнянь [23]

$$[K(P) - k \cdot N(P)] \cdot U = 0, \quad (1)$$

де K – матриця жорсткості конструкції;

N – матриця початкових сил,

k – шуканий масштабний коефіцієнт,

U – вектор вузлових переміщень.

Рівняння (1) породжує задачу на визначення власних чисел k_j

$$\det [K(P) - k_j N(P)] = 0 \quad (2)$$

та відповідних їм власних форм U_j

$$[K(P) - k_j N(P)] \cdot U_j = 0. \quad (3)$$

Тут j – номер форми втрати стійкості ($j=1,2, \dots$).

Основна відмінність співвідношень (1)–(3) від традиційних підходів полягає у тому, що ці системи рівнянь містять параметричні залежності компонентів цих рівнянь від масиву параметрів P . Отже, і

масштабні коефіцієнти k_j , і форми втрати стійкості U_j стають залежними від P :

$$k_j = k_j(P); U_j = U_j(P). \quad (4)$$

Тобто, варіюючи P , можна визначати вплив варіюваного технічного рішення на запас за стійкістю (визначаються $k_1, k_2, k_3, \dots$), а також на форму втрати стійкості $U_1, U_2, U_3, \dots$. Крім того, можлива організація процедури синтезу такого технічного рішення (тобто такого набору параметрів P^*), яке забезпечує заданий рівень стійкості.

Ілюстрація роботи розробленого підходу на прикладі тестової конструкції бронекорпусу легкоброньованої машини. Як ілюстративний приклад залучено бронекорпус, подібний за структурою до корпусу машини МТ-ЛБ (рис. 1). Проте у цьому тестовому корпусі відображено не реальний, а умовний розподіл товщин бронепанелей та елементів внутрішньої структури. У силу такої довільності за номінальну товщину обрано $h = 5 \cdot 10^{-3}$ м (5 мм) у всіх проекціях та перерізах.

На рис. 1 побудована скінченно-елементна модель тестового бронекорпусу із shell-елементів.

Для ілюстрації можливості варіювання здійснено розрахунок k_j та U_j за різних товщин $h = \{2; 5; 10\} \cdot 10^{-3}$ м.

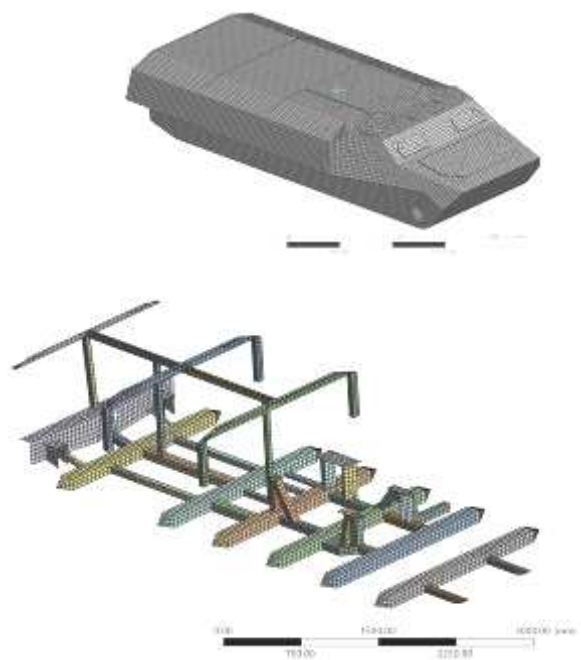


Рисунок 1 – Скінченно-елементна модель тестового варіанту бронекорпусу МТ-ЛБ із однаковою товщиною панелей та елементів посилення

На рис. 2–10 та у табл. 1–3 наведені спектри запасів за стійкістю та форм втрати стійкості досліджуваного бронекорпусу. При цьому базовим варіантом навантаження прийнято надлишковий зовнішній тиск 100 кПа.

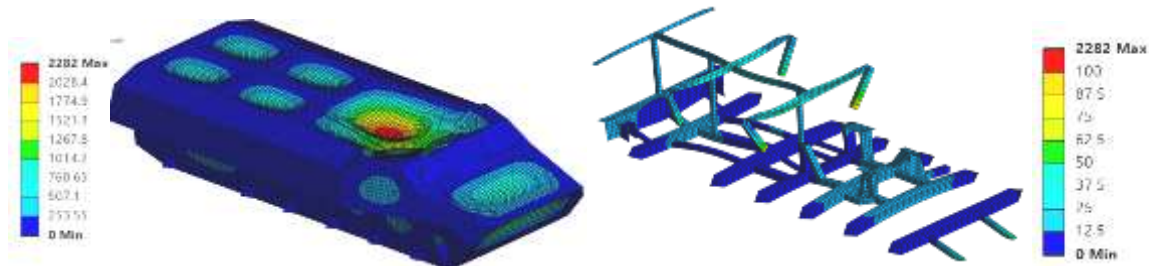


Рисунок 2 – Розподіл повних переміщень у тестовому варіанті бронекорпусу (мм) із товщиною усіх елементів 2 мм при дії надлишкового зовнішнього тиску 100 кПа

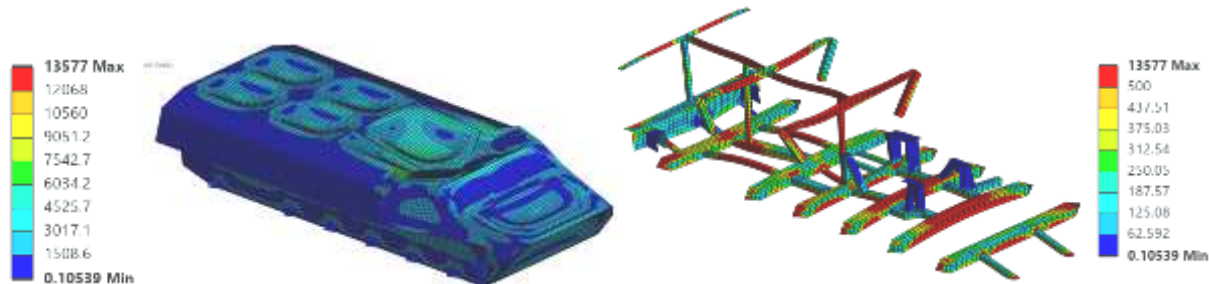


Рисунок 3 – Розподіл еквівалентних напружень за Мізесом (МПа) у тестовому варіанті бронекорпусу із товщиною усіх елементів 2 мм при дії надлишкового зовнішнього тиску 100 кПа

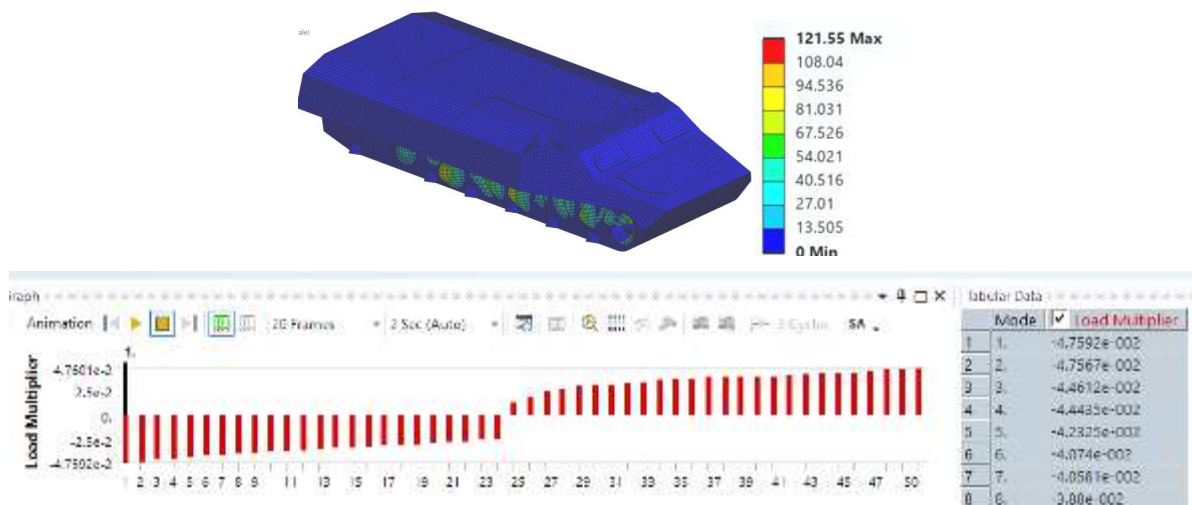


Рисунок 4 – Форма втрати стійкості та коефіцієнти критичних навантажень (бронекорпус із товщинами всіх елементів 2 мм, зовнішній надлишковий тиск 100 кПа)

Таблиця 1 – Деякі форми втрати стійкості тестового варіанту бронекорпусу із товщиною усіх елементів 2 мм при дії надлишкового зовнішнього тиску 100 кПа

N / запас стійкості	Форма втрати стійкості	N / запас стійкості	Форма втрати стійкості
2/-4,7567·10 ⁻²		21/-2,7606·10 ⁻²	

N / запас стій- кості	Форма втрати стійкості	N / запас стій- кості	Форма втрати стійкості
25/1,3293·10 ⁻²		22/-2,7045·10 ⁻²	
26/1,7944·10 ⁻²		39/3,9426·10 ⁻²	
41/3,9815·10 ⁻²		42/4,0489·10 ⁻²	
43/4,1586·10 ⁻²		44/4,2526·10 ⁻²	
45/4,3197·10 ⁻²		46/4,3421·10 ⁻²	
47/4,5106·10 ⁻²		50/4,7601·10 ⁻²	

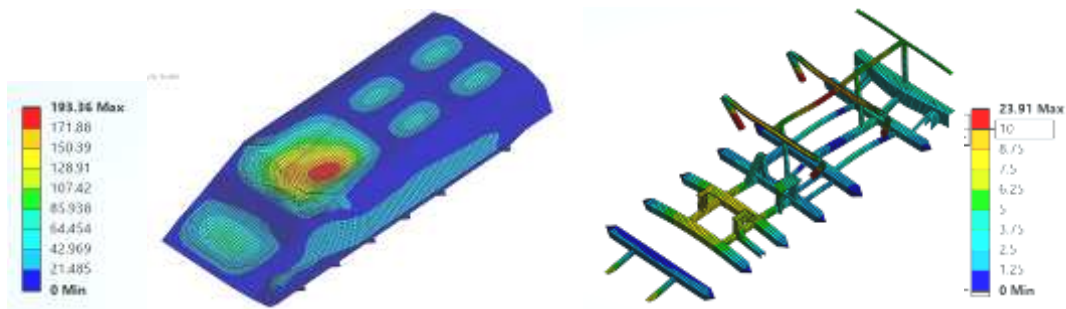


Рисунок 5 – Розподіл повних переміщень у тестовому варіанті бронекорпусу (мм) із товщиною усіх елементів 5 мм при дії надлишкового зовнішнього тиску 100 кПа

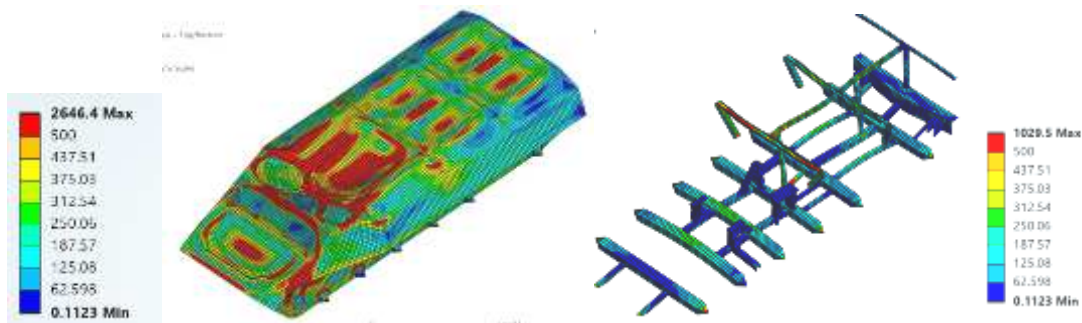


Рисунок 6 – Розподіл еквівалентних напружень за Мізесом (МПа) у тестовому варіанті бронекорпусу із товщиною усіх елементів 5 мм при дії надлишкового зовнішнього тиску 100 кПа

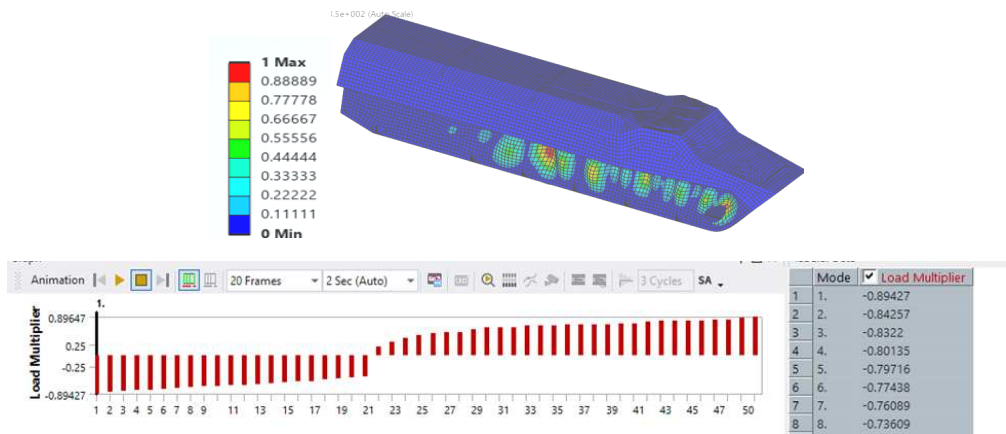
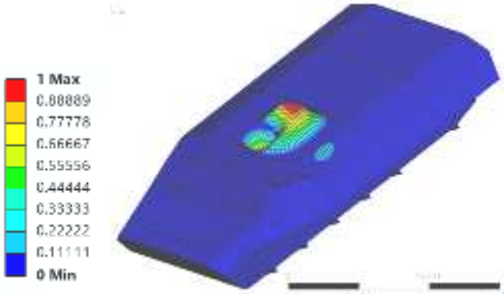
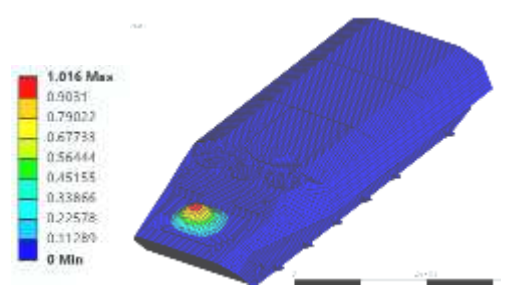
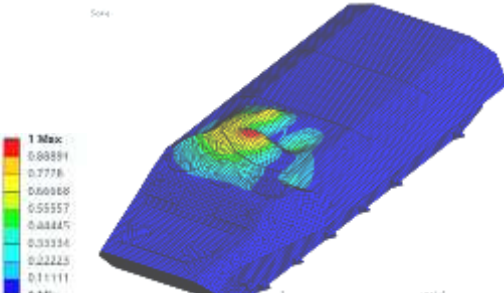
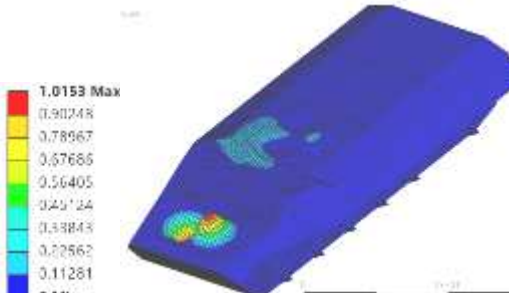
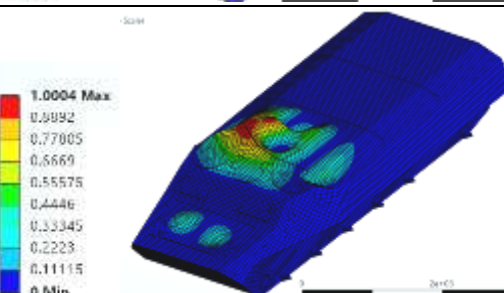
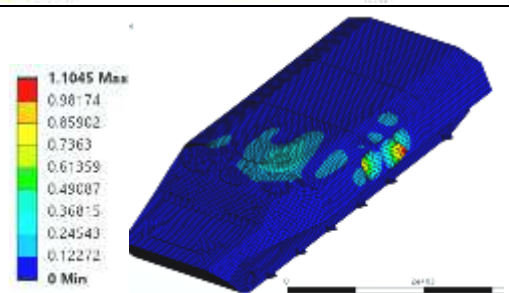
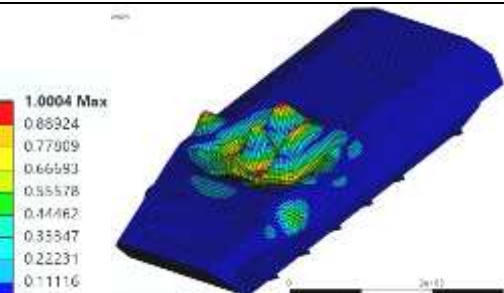
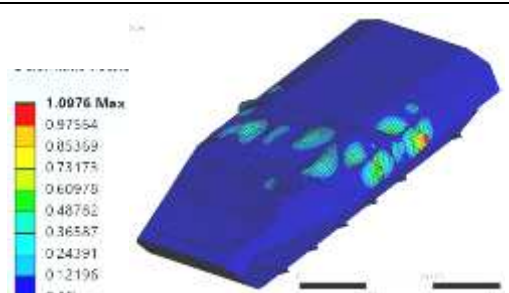


Рисунок 7 – Форма втрати стійкості та коефіцієнти критичних навантажень (бронекорпус із товщинами всіх елементів 5 мм, зовнішній надлишковий тиск 100 кПа)

Таблиця 2 – Деякі форми втрати стійкості тестового варіанту бронекорпусу із товщиною усіх елементів 5 мм при дії надлишкового зовнішнього тиску 100 кПа

N / запас стій- кості	Форма втрати стійкості	N / запас стій- кості	Форма втрати стійкості
22/0,20184		23/0,31403	

N / запас стій- кості	Форма втрати стійкості	N / запас стій- кості	Форма втрати стійкості
24/0,40394		25/0,47666	
26/0,50743		27/0,53577	
28/0,53746		30/0,64514	
35/0,69668		44/0,80668	

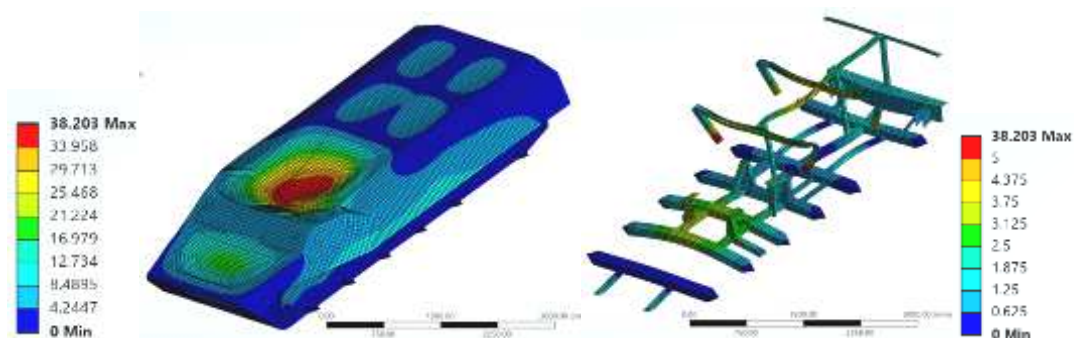


Рисунок 8 – Розподіл повних переміщень у тестовому варіанті бронекорпусу (мм) із товщиною усіх елементів 10 мм при дії надлишкового зовнішнього тиску 100 кПа

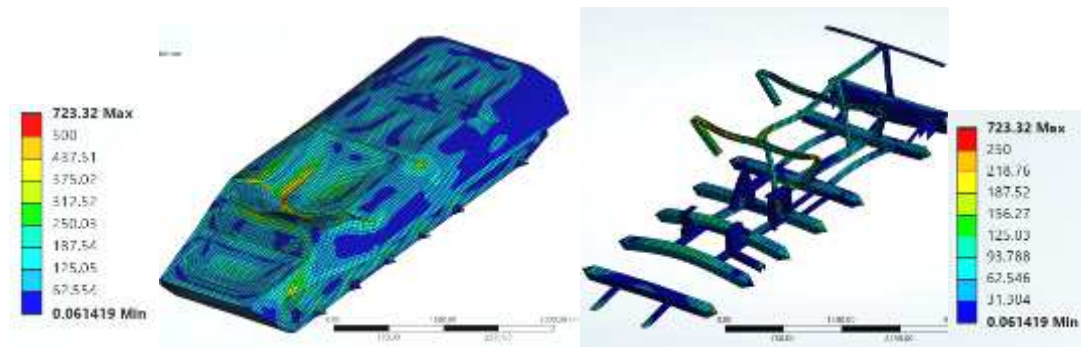


Рисунок 9 – Розподіл еквівалентних напружень за Мізесом (МПа) у тестовому варіанті бронекорпусу із товщиною усіх елементів 10 мм при дії надлишкового зовнішнього тиску 100 кПа

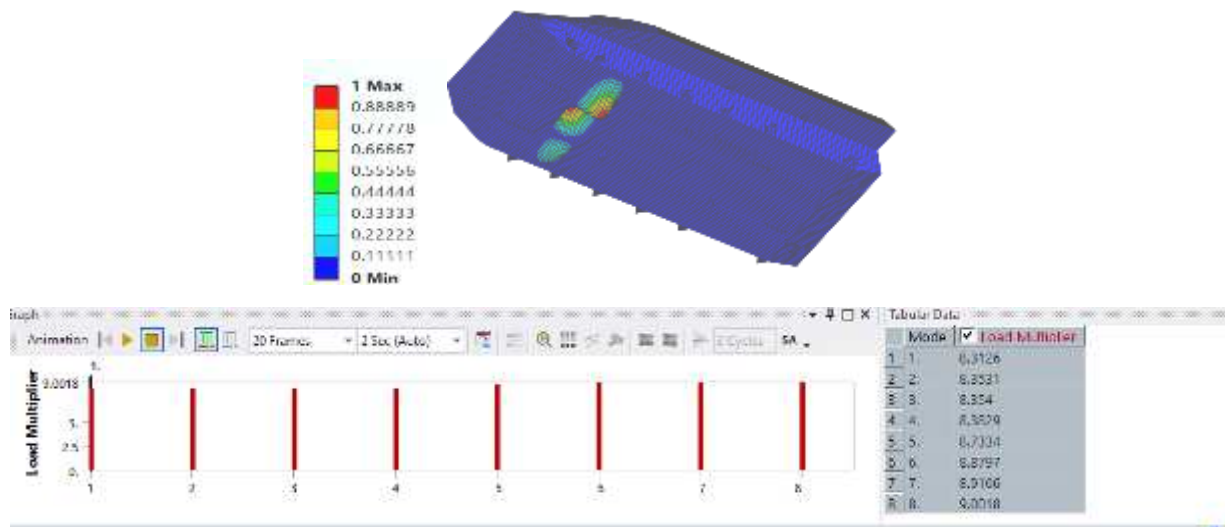


Рисунок 10 – Форма втрати стійкості та коефіцієнти критичних навантажень (бронекорпус із товщинами всіх елементів 10 мм, зовнішній надлишковий тиск 100 кПа)

На додаток до здійснених досліджень було докладніше проаналізовано втрату стійкості тестового бронекорпусу МТ-ЛБ із товщиною усіх бронепанелей 5 мм. Тут взято до уваги, що поведінка реальних конструкцій суттєво залежить від збурень геометричної форми елементів тонкостінних конструкцій та інших чинників. Тому було здійснено аналіз напружено-деформованого стану бронекорпусу із використанням більш подрібненої скінченно-елементної сітки (рис. 11).

Надалі розв'язання роздвоюється:

- 1) ейлерова постановка (табл. 4);
- 2) урахування геометричної нелінійності при визначенні стійкості бронекорпусу (рис. 12).

Аналіз стійкості із використанням нелінійної постановки свідчить, що саме таке формулювання відповідає поведінці реальної конструкції бронекорпусу. Втрата стійкості відбувається при тиску 50,5 кПа.

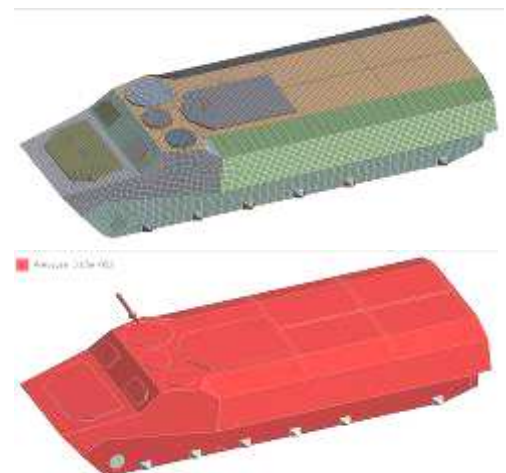
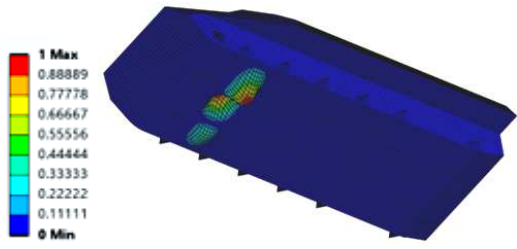
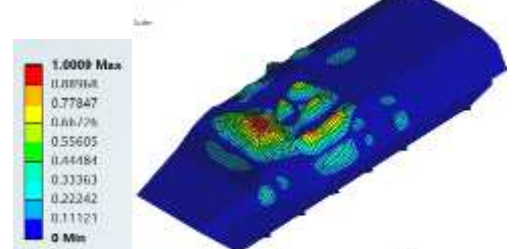
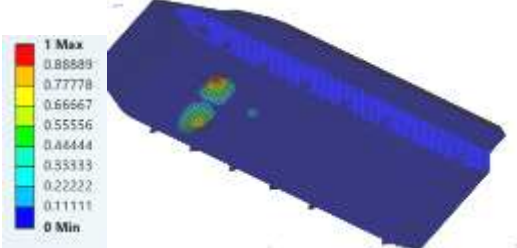
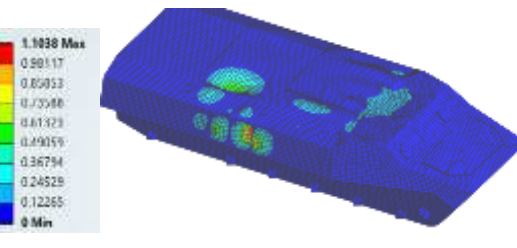
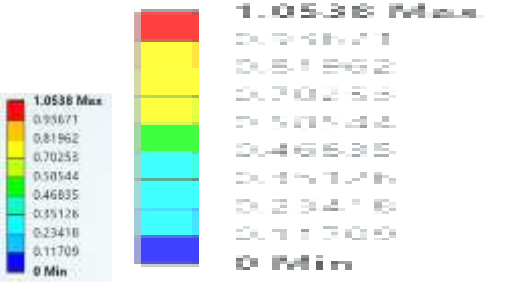
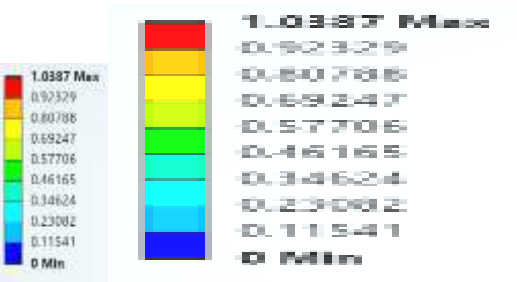
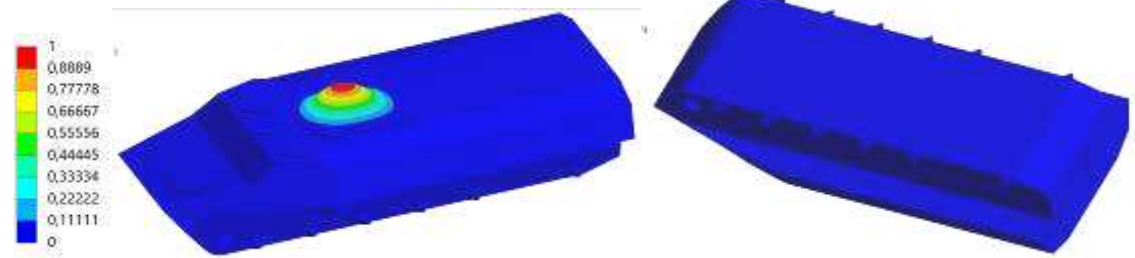
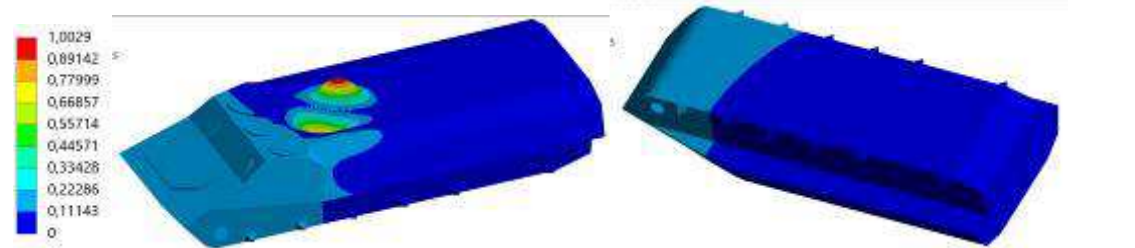


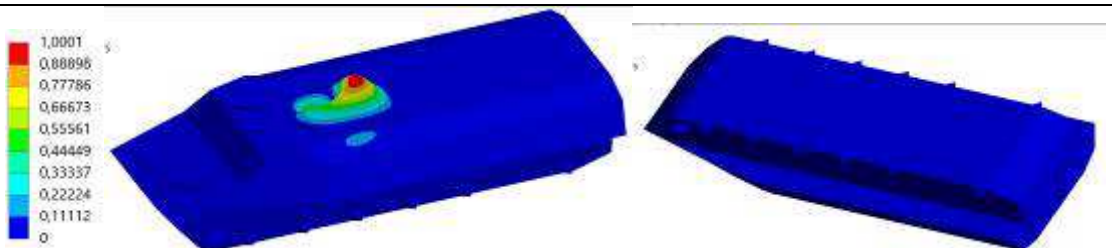
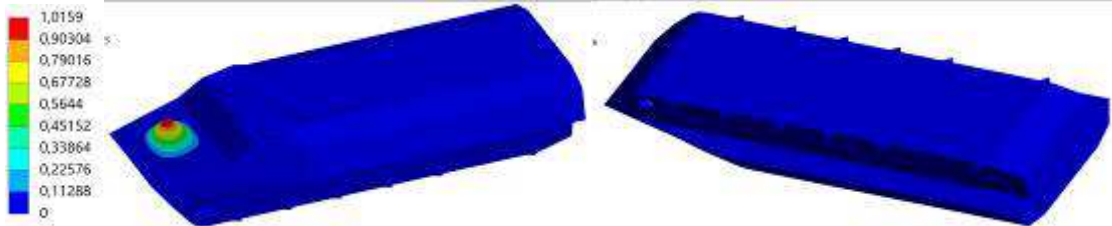
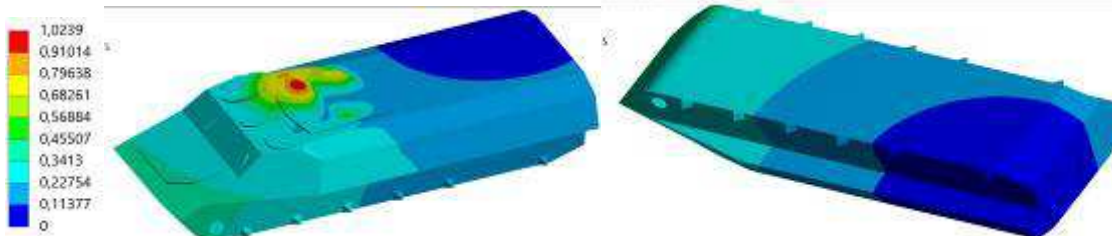
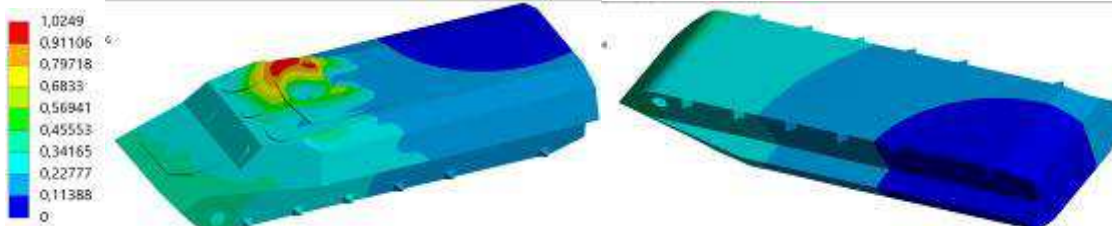
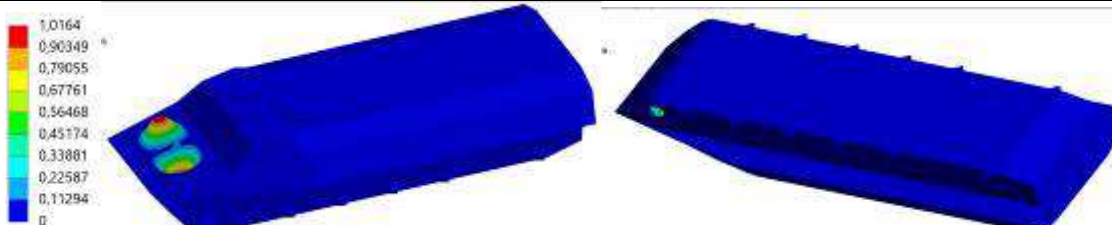
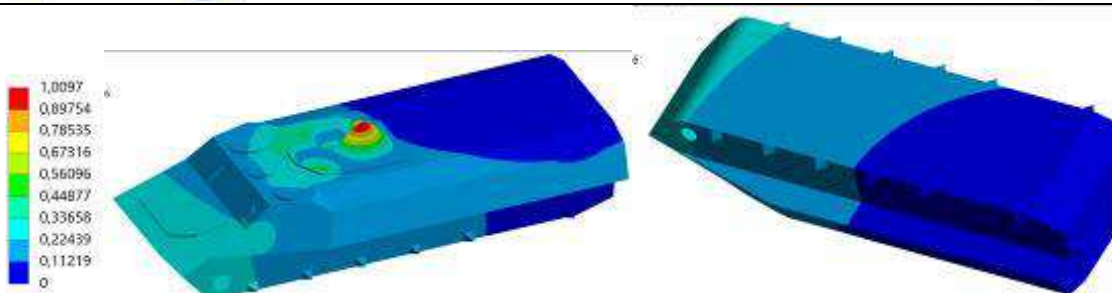
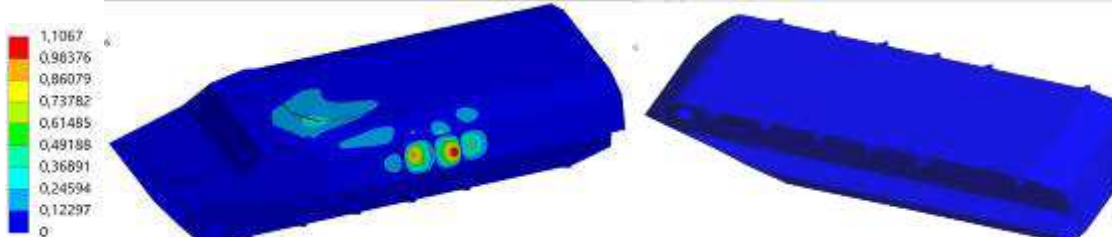
Рисунок 11 – Скінченно-елементна модель МТ-ЛБ зі згущеною сіткою скінченних елементів (навантаження 50,5 кПа)

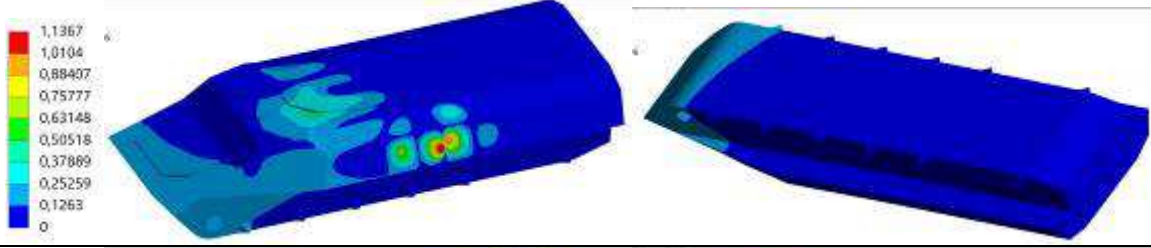
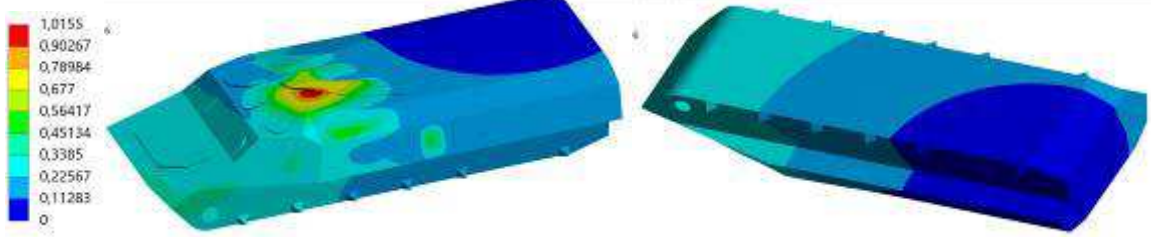
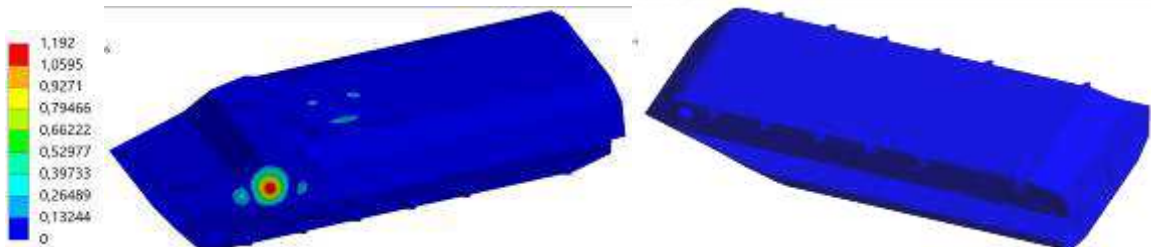
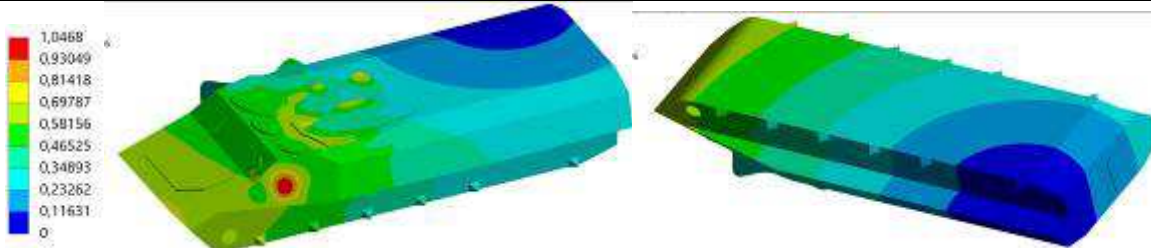
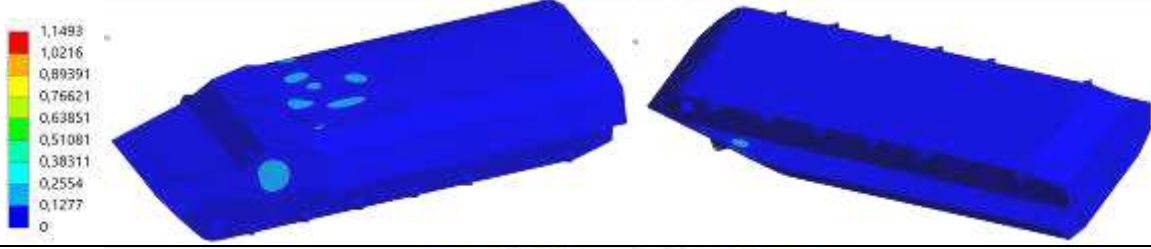
Таблиця 3 – Деякі форми втрати стійкості тестового варіанту бронекорпусу із товщиною усіх елементів 10 мм при дії надлишкового зовнішнього тиску 100 кПа

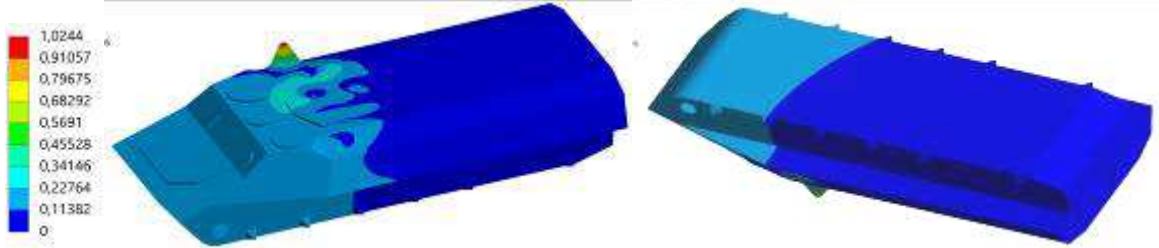
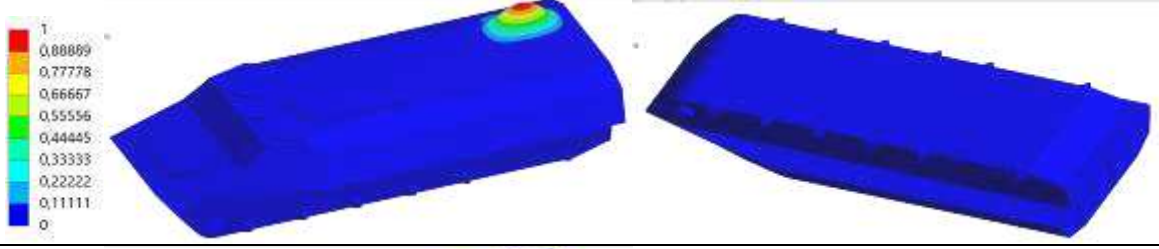
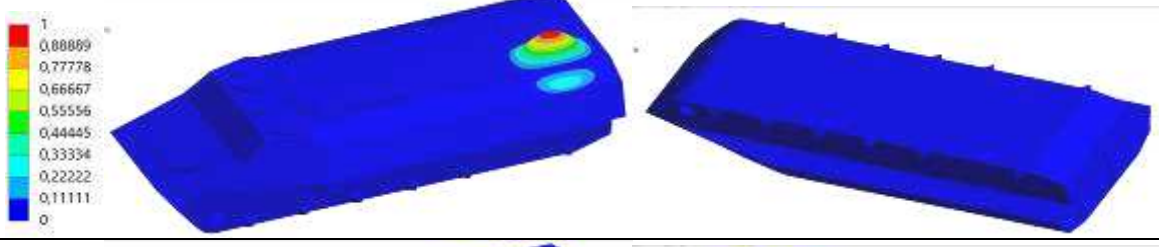
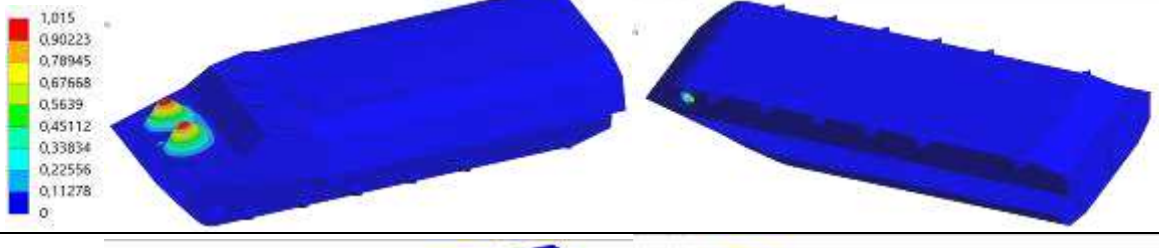
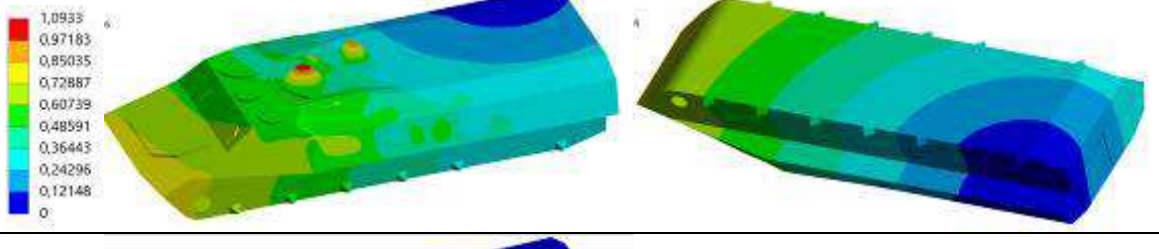
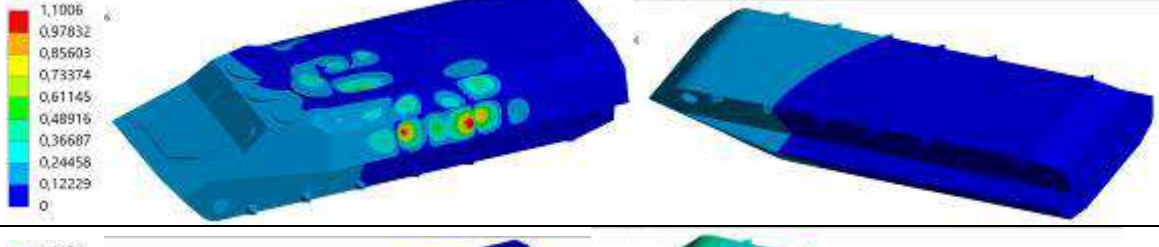
N / запас стій- кості	Форма втрати стійкості	N / запас стій- кості	Форма втрати стійкості
1/8,3126		2/8,3531	
3/8,354		4/8,3829	
5/8,7334	 1.0538 Max 0.93671 0.81962 0.70258 0.58544 0.46835 0.35128 0.23418 0.11709 0 Min	7/8,9166	 1.0387 Max 0.92329 0.80786 0.69247 0.57706 0.46165 0.34624 0.23082 0.11541 0 Min

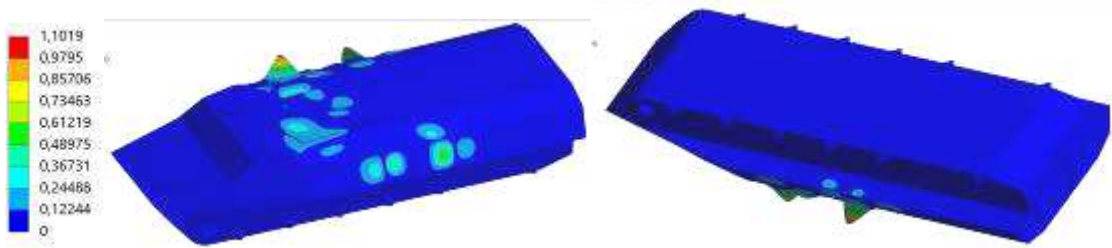
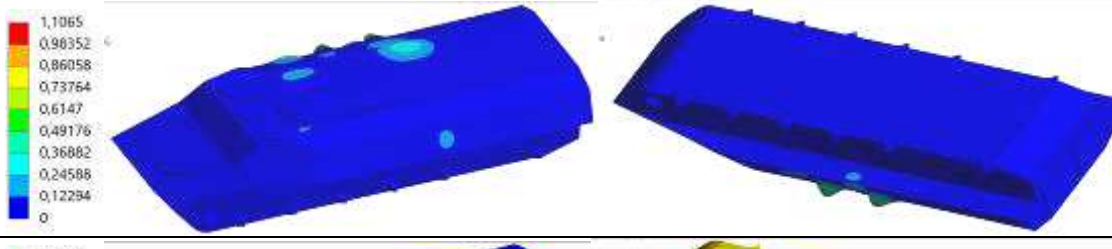
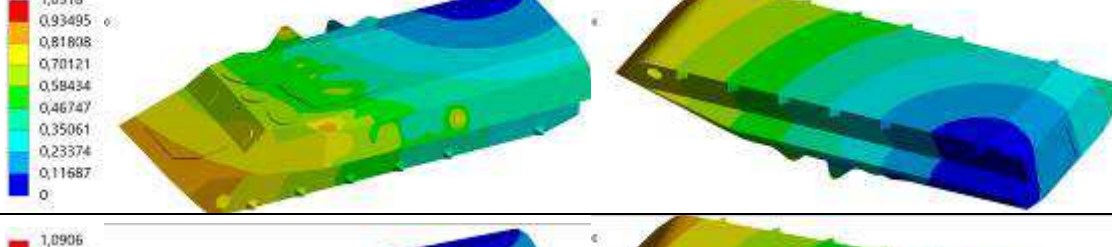
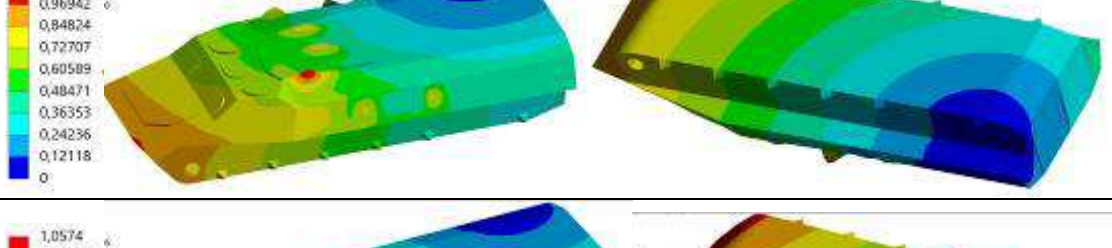
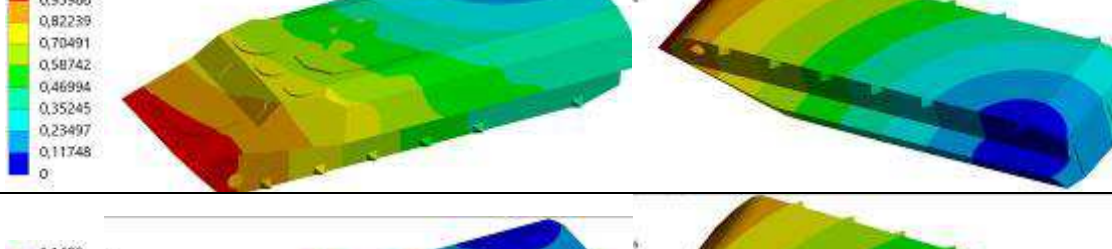
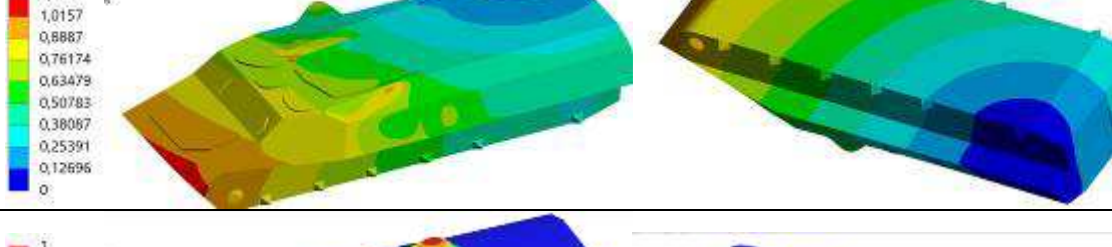
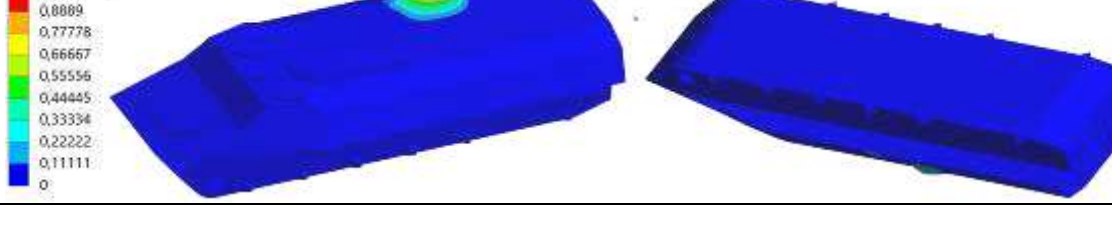
Таблиця 4 – Результати дослідження втрати стійкості корпусу МТ-ЛБ із товщиною усіх елементів 5 мм в ейлеровій постановці

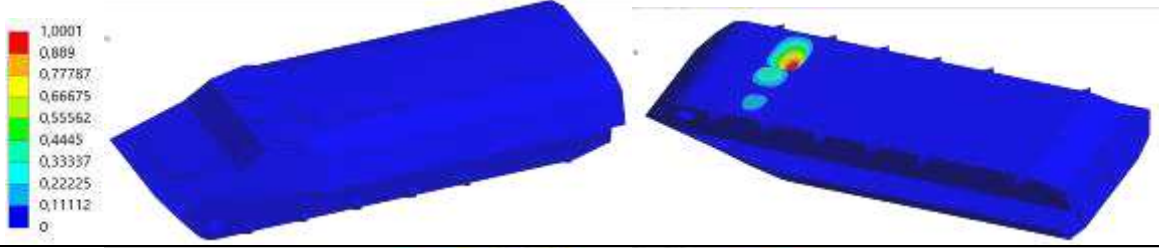
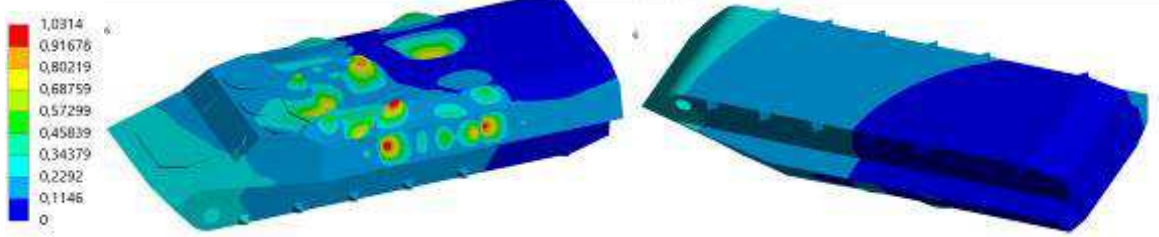
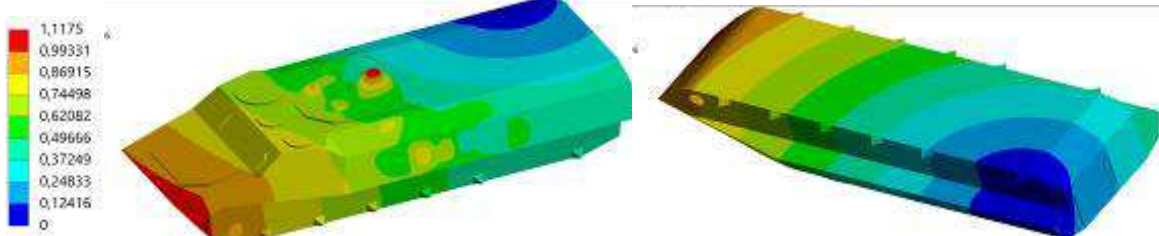
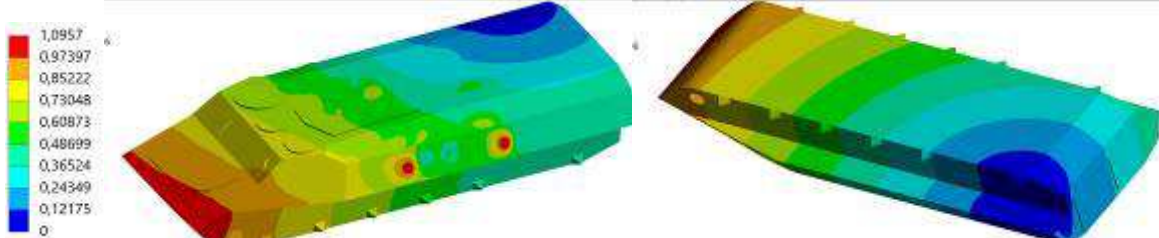
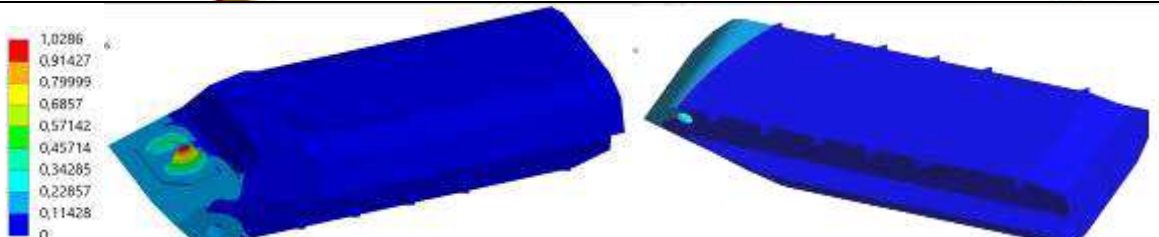
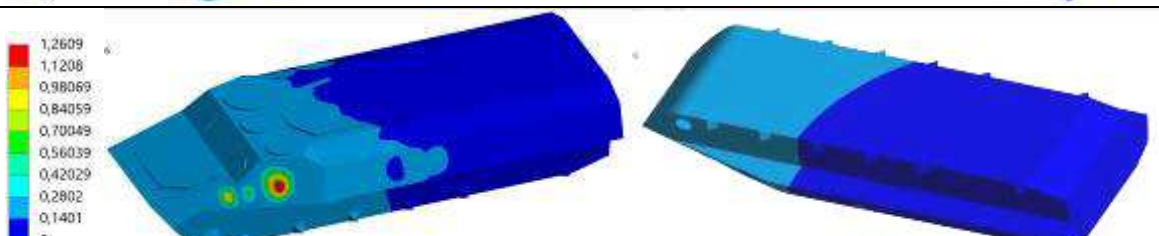
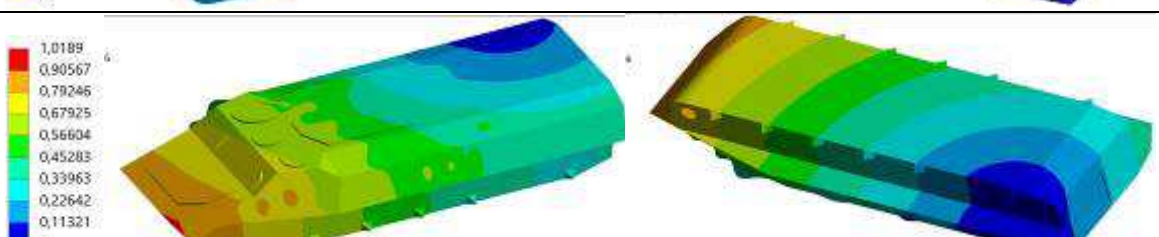
№/ кое- фіцієнт запасу	Форма втрати стійкості
1/0,39793	
2/0,61587	

№/ кое- фіцієнт запасу	Форма втрати стійкості	
3/0,79138		
4/0,9381		
5/0,99122		
6/1,0445		
7/1,0557		
8/1,1738		
9/1,2538		

№/ кое- фіцієнт запасу	Форма втрати стійкості	
10/1,2577		
11/1,2789		
12/1,3476		
13/1,3515		
14/1,3529		
15/1,3771		
16/1,3809		

№/ кое- фіцієнт запасу	Форма втрати стійкості	
17/1,3859		
18/1,4183		
19/1,4441		
20/1,4448		
21/1,5249		
22/1,5594		
23/1,5636		

№/ кое- фіцієнт запасу	Форма втрати стійкості	
24/1,5724		
25/1,581		
26/1,5915		
27/1,5974		
28/1,6958		
29/1,7368		
30/1,8033		

№/ кое- фіцієнт запасу	Форма втрати стійкості	
31/1,8081		
32/1,8146		
33/1,8316		
34/1,8492		
35/1,8861		
36/1,8889		
37/1,8905		

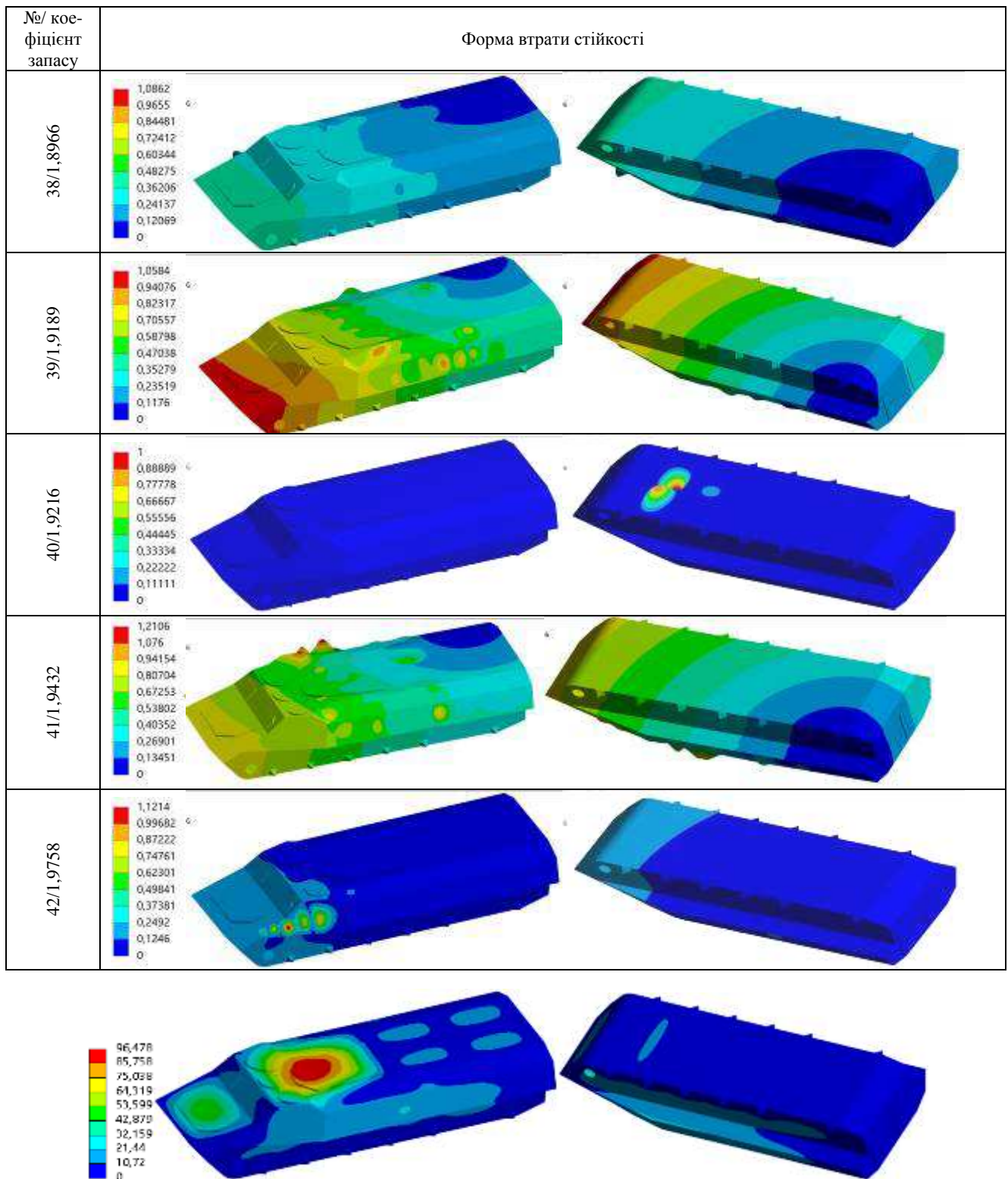


Рисунок 12 – Форма втрати стійкості у бронекорпуса МТ-ЛБ із товщиною усіх елементів 5 мм при дослідженні із урахуванням геометричної не лінійності

Аналіз результатів розрахунків втрати стійкості бронекорпусів легкоброньованих машин від дії ударної хвилі.

1. Як свідчать отримані результати, запас стійкості досліджуваного тестового бронекорпусу суттєво нелінійно залежить від товщини h його елементів. Зокрема, для вихідної товщини $R = 5 \cdot 10^{-3}$ м критич-

ний тиск складає ~ 50 кПа. Таким чином, товщина елементів бронекорпусу є значущим чинником, шляхом варіювання котрого можлива різко нарощувати захищеність від дії надлишкового тиску ударної хвилі.

2. Порівнюючи форми втрати стійкості тестового бронекорпусу, слід зазначити дві особливості.

Перша із них полягає у тому, що при варіюванні h глобальні форми втрати стійкості U_r практично не змінюються. Друга із зазначених особливостей свідчить про перехід локальних форм втрати стійкості U_q при варіюванні h від одного елемента до іншого (тобто одному і тому ж номеру q відповідає за різних h втрата стійкості різних елементів).

3. Важливою обставиною у ході проектних досліджень стійкості бронекорпусів легкоброньованих машин слід приділяти і запасам k_j , і формам U_j . Дійсно, основним критерієм захищеності є збереження життя і здоров'я екіпажу та десанту. Отже, це потребує сумісного аналізу спектрів k_j та форм U_j із огляду на переважну локалізацію прогинів елементів бронекорпусу, а також на схему розміщення особового складу.

Загальним висновком за результатами здійснених досліджень є підтвердження працездатності розроблених підходів, створених моделей та адаптованих методів досліджень. Це дає можливість у перспективі визначати втрату стійкості і «різновисчинних» бронекорпусів (тобто із різними товщинами у різних елементів конструкції), і таких, що містять композитні матеріали (сандвіч-панелі із керамікою, пластиком, гумою тощо), і конструктивних схем із рознесеними стінками, стійкими підсилення, перемичками, кутниками тощо. Це є напрямком подальших досліджень.

Список літератури

1. 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., Миронов Я. А. Актуальні проблеми протимінного та балістичного захисту бойових броньованих машин. С. 5-57.
2. Глебов В. В., Чепков І. Б., Кучинський А. В., Кучинська К. А. Аналіз методів підвищення рівня захисту бронетанкової техніки від ураження з верхньої напівсфери. *Озброєння та військова техніка*. 2021. №1. С. 14-19. DOI:10.34169/2414-0651.2021.1(29).14-19
3. Бісик С. П. Експериментальні дослідження вибухового навантаження макета корпусу бойової броньованої машини. *Collection of scientific papers «АЛОГОС»*. August 12, 2022; Zurich, Switzerland. С. 78-83. DOI 10.36074/logos-12.08.2022.23
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. Maystrenko Anatoliy L., Kushch Volodymyr I., Pashchenko Evgeniy A., Kulich Vitaliy G., Neshpor Oleksiy V., Bisyk Sergiy P. Ceramic armour for armoured vehicles against large-calibre bullets. *Problems of Mechatronics. Armament, Aviation, Safety Engineering*. 2020. Vol. 11, №1. P. 9-16. DOI 10.5604/01.3001.0014.0279
6. 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](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2019.1(21).22-31)
7. Vidya Vijay K. P., Pooja S M, Gayathri S. Shivakumar. Exploring the Design, Analysis, and Applications of Shell Structures, *International Journal of Engineering Research & Technology* (IJERT) Volume 12, Issue 11 (November 2023) doi: 10.17577/IJERTV12IS110195.
8. Qing Wang, Renluan Hou, Jiangxiong Li, Yinglin Ke. Analytical and experimental study on deformation of thin-walled panel with non-ideal boundary conditions. *International Journal of Mechanical Sciences*. Volume 149, 2018, Pages 298-310. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.10.001>.
9. H. Foroughi, C. D. Moen, A. Myers, M. Tootkaboni, L. Vieira, and B. W. Schafer, Analysis and Design of Thin Metallic Shell Structural Members-Current Practice and Future Research Needs. *Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council Toronto, Canada, March 25-28, 2014*.
10. S. Dastjerdi, M. Malikan, V. A. Eremeyev, B. Akg  z, and  . Civalek, On the generalized model of shell structures with functional cross-sections. *Compos Struct*, vol. 272, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114192.
11. Schmidt, Herbert. (2000). Stability of steel shell structures: General Report. *Journal of Constructional Steel Research*. 55. 159-181. doi: 10.1016/S0143-974X(99)00084-X.
12. C.A. Featherston Buckling and post-buckling behavior of unstiffened curved plates under uniform shear. *Thin-Walled Struct.* 2011. Vol. 49. P. 1017-1031. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.03.007>
13. J.P. Martins et al. Imperfection sensitivity of curved panels under combined compression and shear. *Int. J. Non-Linear Mech.* 2003, Vol. 38, P. 225-238. [https://doi.org/10.1016/S0020-7462\(01\)00058-0](https://doi.org/10.1016/S0020-7462(01)00058-0)
14. K. Tran et al. Behavior of thin-walled cylindrically curved steel plates under generalized in-plane stresses: a review. *J. Constr. Steel Res.* 2018. Vol. 140. P. 191-207. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.10.018>
15. G. Brando et al. Experimental and numerical analysis of a multi-stiffened pure aluminium shear panel. *Thin-Walled Struct.* 2011. Volume 49, P. 1277-1287. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.05.007>
16. G. Brando, G. De Matteis. Buckling resistance of perforated steel angle members. *J. Constr. Steel Res.* Volume 81, February 2013, Pages 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.10.009>
17. Filip Ljubinković, Jo o Pedro Martins, Helena Gerv sio, Lu s Sim es da Silva. Resistance of curved steel cross-sections for bridge deck applications: Design proposals. 2021, *Journal of Constructional Steel Research*. Volume 182, July 2021, 106679. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106679>
18. Sara Piculin, Primo  Mo e. Ultimate resistance of longitudinally stiffened curved plates subjected to pure compression. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021, Volume 181, 106616. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106616>.
19. Andr  Dias Martins, Nuno Silvestre. Modal analysis and imperfection sensitivity of the post-buckling behaviour of cylindrical steel panels under in-plane bending. *Engineering Structures*. 2020, Volume 207, 110127. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110127>
20. Filip Ljubinković, Jo o Pedro Martins, Helena Gerv sio, Lu s Sim es da Silva. Ultimate load of cylindrically curved steel panels under pure shear. *Thin-Walled Structures*. 2019. Volume 142, September 2019, Pages 171-188. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.04.022>
21. Шаталов О. Є., Дудар Є. Є., Васильєв А. Ю. Комплексна математична модель аналізу захищеності бойових машин легкої категорії за масою від стрілецької зброї з урахуванням геометрії машини, рельєфу місцевості й додаткового бронювання. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР*. 2019. № 1. С. 93-109. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2019.1.10>
22. Шаталов О. Є., Дудар Є. Є., Васильєв А. Ю. Реалізація базових методів та моделей захищеності бойових машин легкої категорії за масою від кінетичних боєприпасів. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР*. 2019. № 2. С. 97-106. DOI:10.20998/2079-0775.2019.2.09
23. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 7th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. – 756 p.

References (transliterated)

1. *Naukovo-tehnichni pidkrody 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 O. Yu., Slyvinskyy O. A., Davydovs'kyj L. S., Myronov Ya. A. Aktual'ni problemy proty'minnogo ta balistychnogo zaxy'stu bojo-vy'x bron'ovany'x mashyn. P. 5-57.
2. Hlyebov V. V., Chepkov I. B., Kuchyns'kyi A. V., Kuchyns'ka K. A. Analiz metodiv pidvyshchennya rivnya zakhystu bro-netankovoyi tekhniki vid urazhennya z verkhnoyi napivsfery [Analysis of methods for increasing the level of protection of armored vehicles against damage from the upper hemisphere]. *Armaments and military equipment*. 2021, no.1, pp. 14-19. DOI:10.34169/2414-0651.2021.1(29).14-19
3. Bisyk S. P. Eksperymental'ni doslidzhennya vy'buxovogo navanta-zhennya maketa korpusu bojovoyi bron'ovanoi mashyn'. *Collection of scientific papers «АГОС»*. August 12, 2022; Zurich, Switzerland C. 78-83 DOI 10.36074/logos-12.08.2022.23
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. Maystrenko Anatoliy L., Kushch Volodymyr I., Pashchenko Evgeniy A., Kulich Vitaliy G., Neshpor Oleksiy V., Bisyk Sergiy P. Ceramic armour for armoured vehicles against large-calibre bullets. Problems of Mechatronics. *Armament, Aviation, Safety Engineering*. 2020. Vol. 11, №1. P. 9-16. DOI 10.5604/01.3001.0014.0279
6. Bisyk S.P., Chepkov I.B., Vaskivskyy M.I., Davydovskiy L.S., Slyvinskyy O.A., Aristarkhov O.M. (2019). Methods for modelling Air blast on structures in LS-DYNA. Comparison and analysis. *Weapons and Military Equipment*, 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)
7. Vidya Vijay K. P., Pooja S. M., Gayathri S. Shivakumar. Exploring the Design, Analysis, and Applications of Shell Structures, *International Journal of Engineering Research & Technology* (IJERT) Volume 12, Issue 11 (November 2023) doi: 10.17577/IJERTV12IS110195.
8. Qing Wang, Renluan Hou, Jiangxiong Li, Yinglin Ke. Analytical and experimental study on deformation of thin-walled panel with non-ideal boundary conditions. *International Journal of Mechanical Sciences*. Volume 149, 2018, Pages 298-310. <https://doi.org/10.1016/j.ijmeosci.2018.10.001>.
9. H. Froughi, C. D. Moen, A. Myers, M. Tootkaboni, L. Vieira, and B. W. Schafer, Analysis and Design of Thin Metallic Shell Structural Members-Current Practice and Future Research Needs. *Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council Toronto*, Canada, March 25-28, 2014.
10. S. Dastjerdi, M. Malikan, V. A. Eremeyev, B. Akg  z, and   . Civalek, On the generalized model of shell structures with functional cross-sections. *Compos Struct*, vol. 272, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114192.
11. Schmidt, Herbert. (2000). Stability of steel shell structures: General Report. *Journal of Constructional Steel Research*. 55. 159-181. doi: 10.1016/S0143-974X(99)00084-X.
12. C.A. Featherston Buckling and post-buckling behavior of unstiffened curved plates under uniform shear. *Thin-Walled Struct.* 2011. Vol. 49. P. 1017-1031. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.03.007>
13. J.P. Martins et al. Imperfection sensitivity of curved panels under combined compression and shear. *Int. J. Non-Linear Mech.* 2003, Vol. 38, P. 225-238. [https://doi.org/10.1016/S0020-7462\(01\)00058-0](https://doi.org/10.1016/S0020-7462(01)00058-0)
14. K. Tran et al. Behavior of thin-walled cylindrically curved steel plates under generalized in-plane stresses: a review. *J. Constr. Steel Res.* 2018. Vol. 140. P. 191-207. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.10.018>
15. G. Brando et al. Experimental and numerical analysis of a multi-stiffened pure aluminium shear panel. *Thin-Walled Struct.* 2011. Volume 49, P. 1277-1287. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.05.007>
16. G. Brando, G. De Matteis. Buckling resistance of perforated steel angle members. *J. Constr. Steel Res.* Volume 81, February 2013, Pages 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.10.009>
17. Filip Ljubinkovi  , Jo  o Pedro Martins, Helena Gerv  sio, Lu  s Sim  es da Silva. Resistance of curved steel cross-sections for bridge deck applications: Design proposals. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021, Volume 182, July 2021, 106679. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106679>
18. SaraPiculin, Primo   Mo  e. Ultimate resistance of longitudinally stiffened curved plates subjected to pure compression. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021, Volume 181, 106616. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106616>.
19. Andr   Dias Martins, Nuno Silvestre. Modal analysis and imperfection sensitivity of the post-buckling behaviour of cylindrical steel panels under in-plane bending. *Engineering Structures*. 2020, Volume 207, 110127. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110127>
20. Filip Ljubinkovi  , Jo  o Pedro Martins, Helena Gerv  sio, Lu  s Sim  es da Silva Ultimate load of cylindrically curved steel panels under pure shear. *Thin-Walled Structures*. Volume 142, September 2019, Pages 171-188. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.04.022>
21. Shatalov O. Ye., Dudar Ye. Ye., Vasy  yev A. Yu. Kompleksna matematy  chna model' analizu zaxy'shhenosti bojovy'x mashyn legkoyi kategoriyi za masoyu vid strilecz'koyi zbroyi z uraxuvannyam geometriyi mashyn', rel'yefu miscevosti j dodatkovogo bronyuvannya. *Visnyk NTU «KhPI»*. Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR. 2019. No 1. P. 93-109. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2019.1.10>
22. Shatalov O. Ye., Dudar Ye. Ye., Vasy  yev A. Yu. Realizaciya bazovy'x metodiv ta modelej zaxy'shhenosti bojovy'x mashyn legkoyi kategoriyi za masoyu vid kinety  chny'x boyepry'pasiv. *Visnyk NTU «KhPI»*. Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR. 2019. № 2. P. 97-106. DOI:10.20998/2079-0775.2019.2.09
23. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals 7th ed.* Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.

Надійшло (received) 26.02.2025

Відомості про авторів / About the Authors

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.

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.

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 «Інформаційні технології і системи колісних та гусеничних машин ім. О. О. Морозова», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4753-4267>, тел.: (057)7076902, e-mail: m.tkachuk@tmm-sapr.org.

Набоков 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

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

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, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0359-3450>; e-mail: bogach@tmm-sapr.org

Малакей Сергій Андрійович / Malakei Andrii – 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