ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Успенського Бориса Валерійовича** «Коливання композитних багатошарових тонкостінних конструкцій при геометрично нелінійному деформуванні», що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Актуальність теми дисертаційного дослідження зумовлено тим, що на сучасному етапі розвитку аерокосмічної, ракетно-космічної та оборонної галузей наявне стрімке застосування тонкостінних шаруватих композитних конструкцій із новітніх матеріалів, зокрема, функціонально-градієнтних і з різноманітними стільниковими заповнювачами. Експлуатація таких структур нерозривно пов'язана з їхньою складною нелінійною динамічною поведінкою – зародженням автоколивань і хаотичних режимів, а також втратою стійкості за амплітуд, співрозмірних з товщинами складників конструкцій. Це безпосередньо впливає на тримку здатність та цілісність вказаних об’єктів. Оскільки лінійні аналітичні та чисельно-аналітичні методи, як і стандартний скінченно-елементний аналіз, не здатні повною мірою охопити ці ефекти, створення нових дієвих методик дослідження нелінійної динаміки стає необхідною умовою для забезпечення надійного проєктування.

Водночас критичний огляд літературних джерел виявляє низку невирішених методичних проблем. Переважна більшість дослідників спирається на моделі багатошарових конструкцій з осередненими за товщиною пружними характеристиками, тоді як детальні пошарові підходи застосовуються вкрай обмежено – переважно в межах теорій зсуву низького порядку. Це унеможливлює коректний опис нелінійних коливань багатошарових, зокрема, сендвіч-оболонок із м’якими стільниковими заповнювачами, які є основою сучасних полегшених конструкцій.

Вх 146/2026,
від 22.10.2026

Окремою проблемою залишається моделювання складених багатошарових систем: наявні підходи здебільшого зводяться до автономного опису окремих компонентів із подальшим накладанням умов неперервності на границях. Крім того, в задачах аеропружної взаємодії з надзвуковим газовим потоком аналіз флатера здебільшого обмежується лише пошуком межі втрати стійкості початкового положення рівноваги, тоді як закономірності усталених нелінійних коливань у закритичній зоні вивчені недостатньо.

Усе це зумовлює високу наукову та практичну актуальність розробки вдосконалених методів аналізу нелінійних коливань тонкостінних композитних конструкцій, здатних коректно відображати складні ефекти їхнього деформування.

Здобувач приймав участь у виконанні держбюджетних і грантових тематик за темою роботи у 2019–2026 рр., зокрема робіт з номерами держреєстрації 0124U003710, 0120U104923, 0119U102947, 0124U003951, що додатково підтверджує актуальність обраної тематики..

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у докторській дисертації забезпечується застосуванням широко відомих математичних моделей та методів: теорії Редді третього порядку та теорії Амабілі для опису динаміки оболонкової конструкції; поршневої теорії для опису впливу надзвукового повітряного струменя на оболонку; рівнянь Лагранжа II роду для моделювання дискретизованого динамічного відгуку оболонки; методу продовження за параметром для аналізу її частотного відгуку. Аналіз проводився послідовно та із застосуванням строгого математичного апарату. Для верифікації результатів було застосовано метод скінченних елементів та чисельне інтегрування дискретизованих рівнянь руху.

Наукова новизна дисертаційної роботи. Здобувачем запропоновано новий підхід, який дозволяє досліджувати геометрично нелінійні коливання композитних багатошарових оболонок. Розглянуто різноманітні види навантаження на оболонку: параметричне, імпульсне, періодична точкова сила, взаємодія з надзвуковим газовим струменем. Наукова новизна міститься в наступних результатах:

1. На базі теорії Редді третього порядку та нелінійної теорії оболонок Амабілі запропоновано нову чисельно-аналітичну методику аналізу геометрично нелінійних коливань композитних багатошарових оболонок. Математична модель коливань оболонки будується в формі системи звичайних диференційних рівнянь другого порядку. Для отримання цієї системи застосовується метод заданих форм. Аналіз нелінійного частотного відгуку проводиться методом продовження за параметром.

2. Завдяки застосуванню запропонованої методики, виявлено умови, при яких нанокомпозитна циліндрична оболонка втрачає стійкість положення рівноваги та здійснює стійкі автоколивання внаслідок взаємодії з надзвуковим газовим струменем.

3. Проведений аналіз параметричних коливань циліндричної сендвіч-оболонки під дією періодичного стискаючого навантаження дозволив виявити нові стійкі режими коливань, які характеризуються переходом від стоячих до біжучих хвиль у напрямку окружної координати оболонки.

4. Вперше виявлено майже періодичні та хаотичні коливання, що виникають в усіченій конічній сендвіч-оболонці внаслідок взаємодії з надзвуковим газовим струменем. Ці режими виникають при малих значеннях швидкості струменя та характеризуються значними амплітудами.

5. Запропоновано новий метод оцінки ефективних властивостей стільникових заповнювачів на базі скінченно-елементного розрахунку, який дозволив проаналізувати пружні властивості низки стільникових заповнювачів з різною геометрією комірки.

Практичне значення результатів, наведених у дисертаційній роботі. Моделі та методи, які запропоновано здобувачем, дозволяють проводити розширений аналіз коливань композитних багатошарових оболонок, якими часто моделюють компоненти аерокосмічної техніки. Виявлення режимів коливань, що характеризуються великими амплітудами, дозволяє розробляти полегшені конструкції раціональної маси за збереження їхньої тримкої здатності.

Наукові результати, що наведені в роботі, використано при виконанні чотирьох науково-дослідних тематик, що підтверджує їхню практичну значущість.

Оцінка змісту дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел (250 джерел) і п’яти додатків.

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, визначені проблема для вирішення і мета, сформульовані об’єкт і предмет дослідження, обрані методи досліджень, відзначено наукову новизну одержаних результатів, їх обґрунтованість, достовірність та наукове і практичне значення, зазначено зв'язок з науковими програмами, планами і темами, наведено відомості про публікації та особистий внесок здобувача.

Перший розділ містить огляд літературних джерел за темою роботи. У розділі розглядаються роботи, присвячені властивостям композитних оболонок з різною структурою. Показано, що існуючі методики для аналізу нелінійних коливань таких оболонок є недосконалими.

Другий розділ присвячено опису розроблених методів дослідження коливань багатошарових оболонок. Докладно описано математичні моделі коливань оболонок одинарної та подвійної кривизни, застосований метод їхньої дискретизації та побудови рівнянь руху. Повнота та послідовність

викладення дозволяє відтворити запропоновану методику без додаткових джерел.

У **третьому розділі** розглянуто коливання композитних циліндричних оболонок. Здобувачем розв'язано дві задачі: аналіз флатера нанокомпозитної циліндричної оболонки та аналіз коливань циліндричної сендвіч-оболонки під дією параметричного навантаження. Завдяки застосуванню запропонованої методики виявлено та проаналізовано стійкі автоколивання, які здійснює нанокомпозитна оболонка у взаємодії з надзвуковим газовим струменем. У частотному відгуку сендвіч-оболонки з жорсткими обшивками та м'яким стільниковим заповнювачем при збудженні періодичною стискаючою силою виявлено стійкі режими параметричних коливань, які характеризуються переходом від біжучих до стоячих хвиль вздовж кругової координати оболонки та навпаки.

У **четвертому розділі** розглянуто коливання усічених конічних оболонок. Застосування запропонованих моделей в лінійній постановці дозволило проаналізувати перехідні процеси в композитній конічній оболонці з ортотропним шпангоутом. Використавши розроблений підхід для аналізу коливань конічної сендвіч-оболонки у надзвуковому газовому струмені, автором уперше виявлено майже періодичні та хаотичні коливання високої амплітуди, а також показано, що оболонка здійснює стійкі автоколивання при перевищенні критичних параметрів струменя.

У **п'ятому розділі** запропоновану модель адаптовано для аналізу коливань складеної багатошарової конічно-циліндричної оболонки. Ця задача є практично важливою для аерокосмічної галузі, а саме для аналізу динаміки обтічників. За рахунок застосування спеціальної системи базисних функцій, коливання оболонки вдається описати системою звичайних диференційних рівнянь другого порядку без розділення оболонки на складові частини, забезпечивши таким чином компактність та точність розв'язку. Проаналізовано втрату динамічної стійкості складеною оболонкою у надзвуковому газовому струмені.

У **шостому розділі** розроблений підхід застосовано для аналізу нелінійних коливань оболонок подвійної кривизни – сферичної та у формі гіперболічного параболоїда. Розглянуто вимушені коливання оболонок під дією точкової періодичної сили. Завдяки застосуванню нової методики, було отримано частотні відгуки оболонок.

У **сьомому розділі** описано розроблену методику оцінки ефективних пружних властивостей стільникових заповнювачів з різною архітектурою комірки. Методика базується на скінченно-елементному розрахунку окремої комірки заповнювача з урахуванням симетрії.

У **висновках** до дисертаційної роботи описано основні результати, які в ній отримано.

У **додатках** до дисертаційної роботи наведено список опублікованих праць здобувача (Додаток А), довідку про впровадження результатів роботи (Додаток Б) та алгебраїчні вирази до розділів 2 – 4, які за своєю громіздкістю ускладнюють сприйняття тексту (Додатки В – Д).

Наукова новизна здебільшого зосереджена у матеріалі розділів 2, 3, 4 та 7. Аспектам практичного використання присвячено розділи 3 – 6.

Зауваження до дисертаційної роботи

1. Достовірність результатів, отриманих в роботі, не викликає сумніву. Однак, на мій погляд, не вистачає порівнянь власних результатів з результатами інших авторів. Зрозуміло, що деякі результати є абсолютно новими, тому такі порівняння неможливі, але в частині загально відомого та розповсюдженого лінійного аналізу коливань композитних оболонок вони були б доцільними.

2. Для аналізу динамічного відгуку стільникових заповнювачів автором використовується однорідна модель заповнювача з ефективними пружними властивостями. Здобувач не визначив, чому обмежився лише стільниковими заповнювачами, виключивши з розгляду інші види, наприклад, піни або решітчасті заповнювачі.

3. У висновках роботи бракує практичних рекомендацій, які випливають з отриманих результатів. Крім того, при розгляді конкретних задач (розділи 3–6) дещо замало варіативних розрахунків, які б дозволили оцінити ступінь впливу параметрів оболонок на їхню динаміку.

Зазначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи та не стосуються її кваліфікаційних якостей.

Відповідність змісту реферату основним положенням дисертаційної роботи

У рефераті повністю відображено основні положення дисертаційної роботи та головні результати дослідження. Плагіату в роботі не виявлено.

Повнота викладення результатів дисертаційних досліджень у опублікованих працях

У публікаціях здобувача містяться всі основні наукові результати дисертаційної роботи. Вимоги п. 8 Постанови КМУ від 17.11.2021 № 1197 здобувачем виконано. За темою дисертаційної роботи ним опубліковано 54 наукові праці, в тому числі 46 є статтями, з яких 17 включено до наукометричної бази Scopus, з них 13 опубліковано в журналах, які віднесено до першого та другого квартилів.

Висновок про дисертацію в цілому та відповідність її чинним вимогам

Таким чином, вважаю, що дисертація **Успенського Бориса Валерійовича** «Коливання композитних багатошарових тонкостінних конструкцій при геометрично нелінійному деформуванні» є завершеною науковою працею, в якій наведено наукові результати, що спрямовані на розв’язання важливої науково-технічної проблеми аналізу нелінійних коливань багатошарових композитних оболонок. Запропонований підхід дозволяє враховувати геометрично нелінійне деформування багатошарової

конструкції, у тому числі сендвіч-оболонок з м'яким стільниковим заповнювачем.

У рефераті відображено основний зміст роботи. Тема, результати та зміст, що описані в дисертаційній роботі, відповідають паспорту спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла (технічні науки).

Вважаю, що дисертаційну роботу виконано за актуальною темою та на високому теоретичному та науковому рівні. Робота характеризується науковою новизною та практичною цінністю отриманих результатів. Здобувачем при виконанні роботи дотримано принципів академічної доброчесності. Вважаю, що дисертаційна робота відповідає вимогам 7 – 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук» від 17.11.2021 № 1197, а її автор **Успенський Борис Валерійович** заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент,
завідувач відділу моделювання
композитних структур і складних систем
Інституту прикладних проблем механіки
і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України
доктор фізико-математичних наук,
професор Михайло МАРЧУК

Підпис Михайла Марчука
засвідчую
в.о. Вчений секретар ІППММ
ім. Я.С.Підстригача НАНУ
Наталія Джаман