ВІДГУК

офіційного опонента

Склепуса Сергія Миколайовича

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 (технічні науки)

Актуальність теми дисертаційної роботи

Сучасні галузі високих технологій, зокрема аерокосмічна промисловість та ракетобудування, все частіше спираються на використання тонкостінних композитних оболонок із ускладненою внутрішньою архітектурою, такою, як функціонально-градієнтні матеріали чи стільникові заповнювачі нестандартної геометрії. Ці системи демонструють складну нелінійну поведінку, що включає значні переміщення, ефекти втрати стійкості та перехід у критичні режими, здатні спричинити руйнування матеріалу. При цьому існуючі методи моделювання коливань багатошарових композитних оболонок є недосконалими, бо мають такі обмеження: для опису багатошарових систем застосовуються спрощені гомогенізовані моделі з осередненими пружними характеристиками; пошарові підходи використовуються рідко і зазвичай обмежуються теоріями зсуву низького порядку, що унеможливлює коректний опис сендвіч-конструкцій із м'якими заповнювачами. Крім того, малодослідженими залишаються питання аналізу складених багатошарових оболонок, а також поведінка матеріалу в умовах аеродинамічної взаємодії без вивчення подальших нелінійних режимів коливань, наприклад, при дослідженні флатеру.

Через те, що стандартні лінійні та скінченно-елементні підходи не завжди можуть бути використані для аналізу коливань таких складних систем, розробка нових методів аналізу нелінійних коливань тонкостінних

Вх 147/2026
22.10.2026

конструкцій, які б точно враховували особливості нелінійного деформування та структурну будову сучасних композитів, є нагальною науково-практичною задачею.

Актуальність тематики підтверджується виконанням роботи у рамках держбюджетних і грантових тематик, зокрема робіт з номерами держреєстрації 0124U003710 (2024–2026 рр.), 0120U104923 (2020–2021, 2023 рр.), 0119U102947 (2019–2020 рр.), 0124U003951 (2024–2025 рр.), де здобувач був виконавцем окремих етапів.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у докторській дисертації

Наукові положення, висновки і рекомендації, які викладено в дисертації, обґрунтовано використанням строгого математичного апарату та загальновизнаних математичних моделей. Результати лінійного аналізу верифіковано шляхом порівняння властивостей коливань зі скінченно-елементним моделюванням у середовищі ANSYS. Верифікація нелінійних частотних відгуків конструкцій проведена порівнянням з чисельним інтегруванням рівнянь руху.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в тому, що розроблено нову чисельно-аналітичну методику для дослідження геометрично нелінійних коливань композитних багатошарових оболонок під дією параметричних, вимушених навантажень та у взаємодії з надзвуковим газовим струменем. Основними пунктами наукової новизни є наступні:

1. Запропоновано підхід для аналізу геометрично нелінійних коливань композитних багатошарових оболонок, який базується на теорії зсуву високого порядку та нелінійній теорії оболонок. Дискретизація рівнянь руху проводиться методом заданих форм, а аналіз динамічного відгуку – за допомогою методу продовження за довжиною дуги частотного відгуку.

2. Розглянуто нелінійні коливання циліндричних оболонок у взаємодії з надзвуковим газовим струменем та під дією періодичного стискаючого навантаження. Виявлено умови, при яких циліндрична нанокомпозитна

оболонка у взаємодії з надзвуковим газовим струменем втрачає стійкість та починає здійснювати стійкі автоколивання. Вперше виявлено нові явища в частотному відгуку циліндричної сендвіч-оболонки зі стільниковим заповнювачем під дією періодичного стискаючого навантаження: поблизу параметричного резонансу виникають замкнені кільця стійких розв'язків, які характеризуються бігучими хвилями вздовж кругової координати оболонки.

3. Розглянуто нелінійні коливання усіченої конічної сендвіч-оболонки у взаємодії з надзвуковим газовим струменем. Вперше встановлено, що в оболонці можуть виникати майже періодичні та хаотичні коливання зі значною амплітудою при невеликих значеннях швидкості струменя.

Практичне значення результатів, наведених у дисертаційній роботі, полягає в розширенні можливостей аналізу нелінійних коливань композитних багатошарових оболонок, які є поширеними складниками аерокосмічної техніки. При розробці полегшених конструкцій надзвичайно важливо враховувати можливість виникнення режимів коливань з великими амплітудами, які не можуть бути передбачені лінійними моделями. Крім того, в роботі запропоновано методику визначення ефективних механічних властивостей стільникових заповнювачів, яка може бути використана для раціонального вибору типу та геометричних параметрів заповнювача на етапі проєктування конструкції.

Наукові результати роботи використані при виконанні чотирьох грантових науково-дослідних робіт.

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

У **вступі** наведено інформацію щодо актуальності дослідження, сформульовано мету і завдання дослідження, описано наукову новизну та практичне значення результатів роботи.

Перший розділ містить огляд літературних джерел за темою роботи. Розглянуто будову та властивості нанокомпозитних оболонок, сендвіч-

оболонок та конструкцій зі стрингерами та шпангоутами. Обґрунтовано необхідність розвитку цілісного підходу до аналізу нелінійних коливань таких оболонок.

Другий розділ є ключовим в роботі. У ньому описано розроблені методи дослідження коливань багатошарових композитних оболонок при геометрично нелінійному деформуванні. Для опису деформування шарів оболонки застосовано теорію Редді третього порядку та нелінійну теорію оболонок Амабілі. У розділі сформульовано та розв'язано в переміщеннях задачу моделювання напружено-деформованого стану оболонок одинарної та подвійної кривизни. Дискретизовані рівняння руху будуються за допомогою методу заданих форм, а аналіз нелінійного відгуку проводиться методом продовження за довжиною дуги частотного відгуку.

У **розділах з третього по шостий** розроблений підхід застосовано для аналізу нелінійних коливань циліндричних, конічних, складених оболонок та оболонок подвійної кривизни. Розглядаються задачі аналізу вимушених, параметричних та автоколивань оболонок. Описано нові явища, які виникають в таких конструкціях.

У **сьомому розділі** описано метод оцінки ефективних властивостей стільникових заповнювачів на базі скінченно-елементного розрахунку. Результати, отримані в цьому розділі, використовуються при аналізі нелінійних коливань оболонок у розділах 3–6.

Висновки дисертаційної роботи узагальнюють найбільш вагомі результати, описані в попередніх розділах.

Дисертація має п'ять **додатків**. Перший додаток містить список опублікованих наукових праць здобувача з зазначенням його внеску в публікації. Другий додаток підтверджує, що описані в роботі результати було використано при виконанні грантових тематик. У інші додатки винесено громіздкі алгебраїчні вирази, що є частиною викладок у розділах 2–4.

Зауваження до дисертаційної роботи

1. Функціонально-градієнтні матеріали в роботі представлені лише CNT-наноармованими композитами з лінійною залежністю механічних властивостей від товщини. Незрозуміло, чому автор не розглядає інші види сучасних функціонально-градієнтних матеріалів, а також наскільки описані методи є дієвими для аналізу коливань оболонок з матеріалами, властивості яких змінюються за нелінійним законом.

2. У третьому розділі дисертаційної роботи наведено формули (3.1) для оцінки за правилом змішування механічних властивостей нанокомпозитного анізотропного матеріалу. При цьому частина параметрів матеріалу обчислюється за допомогою ізо-деформаційного підходу Фойгта (верхня оцінка), а частина – за допомогою ізо-напруженого підходу Рейсса (нижня оцінка). Було б логічно використовувати один з цих підходів, або обчислювати параметри матеріалу за допомогою середньоарифметичного оцінок Фойгта та Рейсса, яка називається оцінкою Хілла та досить часто використовується в механіці композитів.

3. Автором розглянуто різноманітні задачі як з точки зору геометрії оболонок, так і з точки зору природи навантаження на них. Однак не надано загальних практичних рекомендацій стосовно уникнення небезпечних динамічних явищ. Також роботі дещо бракує аналізу впливу параметрів конструкцій на їхню динамічну поведінку.

4. У розділі 7 наведено порівняльну таблицю для різних видів стільникових заповнювачів. Більш загальноприйнятним способом порівняння механічних властивостей полегшених конструкцій вважається порівняння питомих механічних характеристик, яке в роботі не наведено.

Зазначені зауваження не стосуються актуальності, наукової новизни, достовірності чи практичної значущості роботи і не впливають на її загальну позитивну оцінку. Вони можуть бути враховані як рекомендації для подальшої наукової діяльності здобувача.

Відповідність змісту реферату основним положенням дисертаційної роботи

Зміст реферату повністю відображає основні положення дисертації, відповідає структурі її розділів та містить ключові результати дослідження. Стиль викладення в дисертації та рефераті відповідає загальноприйнятим стандартам та вимогам.

Докторська дисертація не містить матеріалів, які викладено в кандидатській дисертації здобувача. В ході аналізу роботи не було виявлено ознак плагіату.

Повнота викладення результатів дисертаційних досліджень у опублікованих працях

Всі наукові результати дисертаційної роботи є опублікованими, апробація є достатньою. Таким чином, вимоги п. 8 Постанови КМУ від 17.11.2021 № 1197 здобувачем виконано. Здобувачем за темою дисертаційної роботи опубліковано 54 наукові праці, з яких 46 є статтями, з яких 17 включено до наукометричної бази Scopus, з яких 13 опубліковано в журналах, які віднесено до першого та другого квартилів. Всі основні аспекти дисертації описано в цих наукових працях.

Висновок про дисертацію в цілому та відповідність її чинним вимогам

На підставі вищезазначеного, вважаю, що дисертація **Успенського Бориса Валерійовича** «Коливання композитних багатошарових тонкостінних конструкцій при геометрично нелінійному деформуванні» є завершеною науковою працею. У ній представлено наукові результати, які спрямовані на розв'язання важливої науково-технічної проблеми аналізу нелінійних коливань багатошарових композитних оболонок. Запропоновано методи, що дозволяють враховувати геометрично нелінійне деформування конструкції, функціонально градієнтні властивості нових композитних матеріалів, а також проводити аналіз коливань сендвіч-оболонок, в яких механічні властивості шарів значно відрізняються між собою.

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

Вважаю, що представлена дисертаційна робота виконана за актуальною темою, має високий науковий рівень, характеризується науковою новизною та практичною цінністю отриманих результатів. Роботу виконано з дотриманням принципів академічної доброчесності. Вона відповідає вимогам 7, 8, 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,
заступник завідувача відділу термопластичності
Інституту механіки ім. С. П. Тимошенка
НАН України
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник С.М. Склепус

Особистий підпис Склепуса С.М. засвідчую
Вчений секретар Інституту механіки
ім. С.П. Тимошенка НАН України,
д.т.н. Ю.В. Скосаренко

13.09.2026