ВІДГУК

офіційного опонснта Ларіна Олсксія Олсксандровича 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

Широке застосування тонкостінних конструкцій у машинобудуванні, аерокосмічній галузі, будівництві тощо зумовлює розвиток новітніх матеріалів та нестандартних архітектур, які дозволяють підвищити питомі характеристики об'єкту. Зокрема, застосування функціонально-градієнтних матеріалів та багатошарових конструкцій дозволяє підвищити жорсткість та міцність конструкції, зсунути її частотні відгуки в бік збільшення частоти, а також забезпечити високі механічні характеристики при зниженні маси конструкції, що є суттєвою якістю для об'єктів транспортного та аерокосмічного машинобудування, а також при конструюванні швидкомонтованих будівель. Однак при експлуатації багатошарових композитних оболонкових конструкцій виникають складні нелінійні явища: автоколивання, нелінійні резонанси, майже періодичні та хаотичні коливання. Особливо це стосується аерокосмічних об'єктів, які функціонують в екстремальних умовах. Застосування таких класичних засобів, як лінійні розрахункові методи та скінченно-елементний підхід не дозволяє аналізувати ці явища. Аналіз динаміки багатошарових композитних оболонок потребує новітніх підходів, які базуються на нелінійних математичних моделях деформування оболонки, що враховують великі переміщення її точок.

Вх 145/2026,
22.10.2026

Аналіз літературних джерел свідчить, що саме композитні багатошарові оболонки є нсдостатньо досліджсним об'єктом. Зокрсма, більшість дослідників при розгляді багатошарової оболонки покладаються на ефективні пружні властивості оболонки в цілому, ігноруючи індивідуальні механічні властивості кожного шару. Пошарові теорії деформування застосовуються вкрай рідко, і їхня сфера застосування обмежена теоріями низького порядку. Це сильно обмежує можливості аналізу оболонок з м'якими заповнювачами, наприклад, стільниками, пружні властивості яких можуть бути на 1–3 порядки нижчими за пружність обшивок.

Окрім недостатнього охвату дослідженнями багатошарових оболонок, явища, які можуть відбуватися в них, також не знаходять достатнього висвітлення. Так, аналіз флатеру композитних оболонок у надзвуковому струмені здебільшого обмежується пошуком межі стійкості без аналізу подальшого розвитку нелінійних коливань оболонки.

Таким чином, розробка методики аналізу нелінійних коливань тонкостінних багатошарових композитних конструкцій, яка дозволяє враховувати значні переміщення точок оболонки та складну архітектуру її шарів, є актуальною задачею.

Актуальність тематики підтверджується також тим, що вона виконувалася, зокрема, в межах чотирьох грантових тематик у 2019–2026 роках.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у докторській дисертації. При виконанні дисертаційної роботи використано математичні моделі та методи, які знайшли широку апробацію в науковій спільноті: теорія Редді 3 порядку для опису деформування оболонки; теорія Амабілі, що описує динаміку оболонки; метод продовження за параметром для аналізу частотних відгуків оболонки; метод Рунге-Кутта для верифікації результатів, отримання часових залежностей та аналізу перехідних процесів. Верифікацію результатів

лінійного аналізу проведено за допомогою методу скінченних елементів у складі ссртифікованого програмного забсзпсчсння Ansys Workbcnch.

Наукова новизна дисертаційної роботи. У дисертації запропоновано новий методологічний підхід аналізу нелінійних коливань багатошарових композитних оболонок, яка дозволяє враховувати геометрично нелінійне деформування оболонки. Цей підхід застосовано до аналізу коливань об'єктів, що часто зустрічаються в аерокосмічній галузі: циліндричних, конічних, складених конічно-циліндричних оболонок, а також оболонок подвійної кривизни. Розглянуто різні способи збудження коливань оболонок, виявлено нові явища та властивості їхніх коливань.

Наступні результати роботи містять наукову новизну:

– Запропоновано методологічний підхід аналізу нелінійних коливань багатошарових композитних оболонок, який використовує математичну модель оболонки, що базується на теорії Редді 3 порядку та нелінійній теорії Амабілі та формує рівняння руху завдяки дискретизації цієї моделі за методом заданих форм. Для дослідження руху оболонки застосовується метод продовження за параметром, у якому параметром є довжина дуги амплітудно-частотної характеристики.

– Уперше встановлено закономірності втрати динамічної стійкості та формування автоколивань функціонально-градієнтних нанокомпозитних циліндричних оболонок у надзвуковому повітряному струмені залежно від параметрів армування вуглецевими нанотрубками. Визначено особливості впливу типу армування на значення критичного тиску потоку, що визначає втрату стійкості й виникнення автоколивань, а також на рівень амплітуд усталених автоколивань.

– Уперше встановлено закономірності формування параметричних коливань тришарових циліндричних оболонок зі стільниковим заповнювачем поблизу параметричного резонансу, які полягають у виникненні нового режиму коливань, за якого стоячі хвилі замінюються біжучими.

– Уперше встановлено закономірності переходу між періодичними, квазіпсріодичними та хаотичними рсжимами коливань конічних ссндвіч-оболонок у надзвуковому повітряному струмені залежно від параметрів потоку. Показано, що для консольних оболонок реалізується послідовність біфуркацій, яка призводить до виникнення квазіперіодичних і хаотичних режимів з істотно більшими амплітудами коливань

– Набули розвитку теоретичні обчислювальні підходи оцінки ефективних властивостей стільникових заповнювачів, який застосовано до заповнювачів 4 різних топологій.

Практичне значення результатів, наведених у дисертаційній роботі. Запропонований у дисертації методологічний підхід чисельно-аналітичного аналізу нелінійної динаміки композитних оболонок має суттєву практичну цінність для проєктування та розрахунку перспективних елементів аерокосмічних об’єктів. Він дозволяє вже на ранніх стадіях інженерного проєктування запобігати виникненню небажаних і небезпечних режимів коливань (зокрема, нелінійного флатеру та резонансів). Встановлені закономірності впливу топології та характеристик наповнювачів на динамічний відгук тонкостінних структур є обґрунтованим підґрунтям для прийняття раціональних технологічних і конструктивних рішень з метою підвищення їх функціональних показників. Отримані результати мають прикладне значення не лише для аерокосмічної галузі, а й можуть бути успішно застосовані в транспортному машинобудуванні, цивільному будівництві та інших галузях інженерії, де використовуються тонкостінні композитні елементи, що зазнають інтенсивного динамічного та аерогідродінамічного впливу.

Оцінка змісту дисертації. Дисертаційна робота містить анотацію, вступ, сім розділів, висновки, список використаних джерел, п’ять додатків.

Вступ містить мету, задачі роботи, її наукову новизну та практичну цінність.

У першому розділі наведено огляд літературних джерел за темою дисертації. Проведений аналіз свідчить про обґрунтування високої актуальності напрямку досліджень та підходів що розглядаються в дисертаційній роботі: майже 65% опрацьованої літератури опубліковано після 2017 року, а 30% до останніх п'яти років (2022–2026 рр.), що є вагомим показником для докторської дисертації з технічних наук. Теоретичне підґрунтя роботи також органічно поєднує фундаментальні класичні праці в галузі механіки та теорії коливань (L.J. Gibson & M.F. Ashby, J.N. Reddy, B.B. Болотін, L. Meirovitch, S. Wiggins). В оглядовій частині критично та якісно висвітлено передовий стан досліджень у галузі функціонально-градієнтних матеріалів (FGM), сендвіч-структур із з honeycomb/auxetic наповнювачем, нелінійної динаміки оболонок, нанокомпозитів (CNT/GPL).

Другий розділ містить опис запропонованої методики дослідження коливань багатошарових композитних оболонок одинарної та подвійної кривизни. Математичні моделі деформування оболонок базуються на теорії Редді 3 порядку, для опису динаміки оболонки застосовується нелінійна теорія Амабілі. Отримано рівняння руху оболонки в формі системи звичайних нелінійних диференційних рівнянь II порядку. Описується метод дослідження цих рівнянь та побудови амплітудно-частотної характеристики об’єкта.

Третій розділ присвячено застосуванню розробленої методики для розв’язання задач аналізу коливань циліндричних композитних оболонок. Першою задачею є аналіз автоколивань нанокомпозитної циліндричної оболонки в надзвуковому газовому струмені. Виявлено та проаналізовано стійкі автоколивання оболонки. Друга задача – аналіз параметричних коливань сендвіч-оболонки. Виявлено нове явище в амплітудно-частотній характеристиці – замкнені кільця стійких розв’язків, які супроводжуються бігучими хвилями вздовж кругової координати.

Четвертий розділ присвячено використанню запропонованої методики при аналізі коливань усічсних конічних оболонок. Застосування лінійної тсорії деформування спільно з методом Рунге-Кутта дозволило проаналізувати перехідні процеси в композитній конічній оболонці з ізотропним шпангоутом. Нелінійний аналіз коливань конічної сендвіч-оболонки в надзвуковому повітряному струменя дозволив виявити майже періодичні та хаотичні коливання консольної оболонки, а також проаналізувати стійкі автоколивання оболонки при різних способах закріплення.

П'ятий розділ містить аналіз коливань складеної конічно-циліндричної оболонки за допомогою лінійного варіанту запропонованих математичних моделей. Для аналізу коливань оболонки застосовується система кусково-лінійних базисних функцій, що дозволяє уникнути штучного зшивання елементів конструкції за рахунок додаткових в'язів чи штрафних функцій. Проведено аналіз втрати динамічної стійкості складеною оболонкою в надзвуковому повітряному струмені.

У **шостому розділі** розглядаються вимушені коливання оболонок подвійної кривизни під дією точкової періодичної сили. Застосування розробленої методики дозволило побудувати амплітудно-частотні характеристики для сферичної оболонки та оболонки в формі гіперболічного параболоїда.

Сьомий розділ містить опис методики розрахунку ефективних властивостей стільникових заповнювачів за допомогою скінченно-елементного аналізу. Досліджено властивості заповнювачів з різними комірками: класичною гексагональною, трикутною, квадратною, ауксетичною.

У **Висновках** до дисертаційної роботи описано основні отримані результати.

У **додатках** до дисертаційної роботи наведено список опублікованих праць здобувача, довідку про впроваджсння рсзультатів роботи та громіздкі алгебраїчні вирази до розділів 2 – 4.

Зауваження до дисертаційної роботи

1. У розділах 3 та 4 для верифікації розроблених математичних моделей і оцінки точності визначення спектрів власних частот у якості референсних (бенчмаркових) розрахунків використано результати скінченно-елементного (СЕ) моделювання в ПК ANSYS Workbench. Втім, використання СЕ моделей як еталону вимагає окремого обґрунтування, оскільки СЕ модель за своєю суттю також є наближеною. Крім того, у зазначених розділах бракує детального опису СЕ формулювань: не вказано тип використаних скінченних елементів (оболонкові чи об'ємні 3D-елементи та їхній порядок апроксимації), вибір та розбиття сітки, особливості реалізації граничних умов та їх повна відповідність аналітичним/чисельним постановкам здобувача. Також відсутній аналіз збіжності за сіткою та оцінка похибки СЕ-дискретизації. Хоча залучення СЕ моделювання для верифікації є безумовно позитивним аспектом роботи, для повноти аналізу необхідна детальна паспортизація використаних СЕ моделей.

2. Розділ 5 є цілком логічним методологічним продовженням розділів 3 та 4 (перехід від елементарних канонічних форм до складених конструкцій). Однак у висновках до розділу та загальному аналізі результатів бракує детального порівняльного зіставлення з раніше отриманими закономірностями. Було б доцільно чіткіше висвітлити, як саме динамічні ефекти та нелінійні залежності, встановлені окремо для циліндричної та конічної оболонок, трансформуються або проявляються у складеній конічно-циліндричній конструкції.

3. У розділі 7 наведено цінні результати з визначення ефективних механічних характеристик стільникових заповнювачів на основі СЕ гомогенізації. Проте, як і в попередніх розділах, відчувається брак інформації

щодо самих СЕ моделей: не наведено відомостей про тип і розмірність скінчсннних слсмснтів, прийняті кінсматичні гіпотсзи, щільність сітки, а також відсутні методичні оцінки похибок апроксимації та дискретизації репрезентативного об'єму (RVE).

4. Значну частину нелінійних динамічних задач у роботі розв'язано чисельними методами з явним інтегруванням рівнянь руху за часом. Разом з тим у роботі не наведено систематичних оцінок стійкості та точності використовуваних чисельних схем: бракує обґрунтування вибору кроку інтегрування по часу, оцінки накопиченої похибки на тривалих інтервалах спостереження, а також опису методології постобробки часових реалізацій для ідентифікації хаотичних та майже періодичних режимів.

5. Автором представлено ефективний метод гомогенізації пружних властивостей стільникових заповнювачів. Але в задачах, що розглянуті в розділах 3–6, використовується лише модель шестикутного заповнювача з тими самими властивостями. Було б доцільним порівняти вплив типу заповнювача на динамічні процеси, що відбуваються в оболонках.

6. При розгляді функціонально-градієнтних матеріалів здобувач обмежується композитами, що армовані вуглецевими нанотрубками, та лінійними законами армування. У роботі немає пояснення цього обмеження, а також не визначено, чи будуть розроблені моделі ефективними для матеріалів з нелінійним розподілом армуючих частинок.

7. У дисертації розв'язано велику кількість задач, що переконливо демонструють широкі можливості запропонованого чисельно-аналітичного підходу. Проте автором не завжди уточнюється, чи відповідають обрані геометрії оболонок, типи закріплень та діапазони навантажень геометричним та експлуатаційним параметрам реальних об'єктів аерокосмічної техніки.

Зазначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Відповідність змісту реферату основним положенням дисертаційної роботи

У рефераті повністю відображено основні положення дисертаційної роботи та результати проведеного дослідження.

Плагіату в роботі не виявлено.

Повнота викладення результатів дисертаційних досліджень у опублікованих працях

Публікації здобувача містять всі основні результати дисертації. Здобувачем виконано вимоги п. 8 Постанови КМУ від 17.11.2021 № 1197. За темою дисертаційної роботи ним опубліковано 54 наукові праці, з яких 46 є статтями, з яких 17 включено до наукометричної бази Scopus, з яких 13 опубліковано в журналах першого та другого квартилів.

Висновок про дисертацію в цілому та відповідність її чинним вимогам

На основі вищевикладеного, вважаю, що дисертація **Успенського Бориса Валерійовича** «Коливання композитних багатошарових тонкостінних конструкцій при геометрично нелінійному деформуванні» є завершеною науковою працею, в якій наведено наукові результати, які спрямовано на розв'язання науково-технічної проблеми аналізу нелінійних коливань багатошарових композитних оболонок з урахуванням впливу великих переміщень точок оболонки. Запропонований підхід дозволяє проводити аналіз коливань багатошарових та функціонально-градієнтних конструкції.

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).

Таким чином, вважаю, що дисертаційну роботу виконано за актуальною темою на високому 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, 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,
в.о. проректора з наукової роботи
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»
член-кореспондент НАН України
доктор технічних наук,
професор Олексій ЛАРІН

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ * Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут" * код 02071180 *

Підпис
ЗАСВІДЧУЮ:
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"
"__" _____ 20____ р.