

В І Д Г У К

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Борисенка Максима Юрійовича

«Чисельний та експериментальний аналіз вільних коливань багатокутних пластин і циліндричних оболонок з конструктивною неоднорідністю»,
поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Дисертаційна робота Борисенка М.Ю. «Чисельний та експериментальний аналіз вільних коливань багатокутних пластин і циліндричних оболонок з конструктивною неоднорідністю» присвячена важливій проблемі механіки деформівного твердого тіла, а саме, розробці та розвитку методів визначення частот і форм вільних коливань багатокутних пластин і циліндричних оболонок з конструктивною неоднорідністю та встановленню впливу зміни різних конструктивних параметрів на динамічні характеристики досліджуваних пружних тіл.

Особливість дисертаційної роботи полягає в декількох важливих аспектах. По-перше, поширено метод скінченних елементів на новий клас задач пластин і оболонок з різною конструктивною неоднорідністю. По-друге, проведено ряд експериментальних досліджень двома різними методами, результати яких показали хорошу збіжність з результатами отриманими чисельним методом, що є важливим та необхідним при побудові розрахункових моделей нових об'єктів досліджень. По-третє, розроблено новий метод швидкого розрахунку частот і форм вільних коливань багатокутних пластин різної товщини, що є актуальним та корисним в інженерній практиці, зокрема, в будівництві. Не менш важливим в роботі є те, що автор приділяє увагу вивченню та візуалізації форм вільних коливань пластин та оболонок та встановленню топології форм коливань багатокутних пластин та пластин однієї геометричної форми з різними комбінаціями жорстко закріплених та вільних країв, а також представляє частоти і форми плерарних коливань багатокутних пластин.

Структура рукопису включає анотацію, вступ, сім розділів основного тексту, висновки, список використаних джерел та два додатки. Загальний обсяг дисертації – 341 сторінка.

Основні наукові результати, викладені в дисертаційній роботі, опубліковані у 39 наукових працях, серед яких: 3 публікації представлені як розділи англomовних монографій з механіки деформівного твердого тіла та індексуються у базі даних Scopus; 18 статей опубліковано у наукових фахових виданнях України за спеціальністю дисертації, з них 7 – у виданнях, що індексуються у базі даних Scopus і належать до третього квартиля (Q3); 1 стаття – у науковому журналі, що не входить до переліку фахових видань; 17 – тез доповідей на міжнародних і всеукраїнських конференціях. Результати роботи пройшли достатньо широку апробацію на семінарах та наукових конференціях. Наведені публікації в повній мірі висвітлюють основний зміст роботи та опубліковані

після захисту кандидатської дисертації автора. Докторська дисертація не містить матеріалів, викладених у кандидатській дисертації здобувача.

Отримані наукові результати відповідають одному з основних напрямків наукових досліджень відділу обчислювальних методів Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України та увійшли у звіти з 7 науково-дослідних робіт.

У **першому розділі** подано стислий огляд відомих наукових праць, присвячених різним етапам становлення задач динаміки пластин і оболонок. Розглянуто публікації, в яких простежується зародження вивчення коливань зазначених об'єктів, формування цього напрямку як окремого розділу динаміки та розвиток методів визначення частот і форм вільних коливань. Особливу увагу приділено чисельним і експериментальним підходам, а також проаналізовано сучасний стан досліджуваної проблеми.

У **другому розділі** представлено деякі теоретичні відомості про коливання пластин і оболонок в рамках теорії Кірхгофа – Лява. Представлено зведену формулу вільних коливань квадратної пластини з довільними граничними умовами, яка представляє собою добуток трьох коефіцієнтів та запропоновано поширити дану формулу на визначення частот багатокутних пластин з довільними граничними умовами на краях. Наведено основні принципи та співвідношення методу скінченних елементів. Запропоновано застосувати програмний комплекс інженерного розрахунку FEMAP для розрахунків частот і форм вільних коливань пластин і оболонок різної конструктивної неоднорідності. Запропоновано два експериментальні методи: метод голографічної інтерферометрії, резонансний метод.

У **третьому розділі** проведено дослідження вибору типу та розміру скінченного елемента та оцінку достовірності отриманих результатів розрахунку методом скінченних елементів за допомогою розв'язування двох тестових задач. Проведено розрахунок частот та форм вільних коливань багатокутним пластин правильної форми при різних граничних умовах та встановлено коефіцієнти граничних умов для різних варіантів жорстко закріплених та вільних країв. Розраховано частоти вільних коливань багатокутних пластин з десяти різних матеріалів та різної товщини. Встановлено ряд залежностей частот вільних коливань від зміни різних параметрів пластин.

У **четвертому розділі** методом скінченних елементів проведено розрахунок частот та форм вільних коливань багатокутним пластин з отвором при різних граничних умовах. Встановлено коефіцієнти для різних варіантів жорстко закріплених країв та отвору. Досліджено вплив положення круглого отвору та величини його радіусу на розподіл частот та форм вільних коливань пластин.

У **п'ятому розділі** розраховано коефіцієнти форм коливань і граничних умов для різних багатокутних пластин правильної форми із фіксованим співвідношенням товщини пластини до сторони пластини з різними граничними умовами. Поширено зведену формулу на розрахунок частот вільних коливань багатокутних пластин правильної форми різної товщини з різними граничними умовами. Зроблено узагальнення використання зведеної

формули для кожної з розглянутих пластин, а також проведено порівняння отриманих результатів з результатами розрахованими методом скінченних елементів.

У шостому розділі представлено дві розроблені установки: віброустановка для проведення експериментального дослідження частот і форм вільних коливань пластин резонансним методом та стробокомплекс для проведення експериментального дослідження частот і форм вільних коливань пластин методом стробоголографічної інтерферометрії, а також представлено методики проведення кожного з експериментів. Визначено частоти та форми вільних коливань багатокутних пластин з отвором та без з різними граничними умовами та проведено порівняння з частотами та формами вільних коливань розрахованими методом скінченних елементів.

У сьомому розділі проведено дослідження типу та розміру скінченного елемента та оцінку достовірності отриманих результатів розрахунку методом скінченних елементів за допомогою розв'язування трьох тестових задач. Проведено розрахунок частот і форм вільних коливань замкнутих та незамкнутих циліндричних оболонок еліптичного та гофрованого поперечного перерізу, встановлені залежності частоти вільних коливань від граничних умов накладених на торці оболонки, фізико-механічних характеристик матеріалу та характеру розкриття оболонки. Досліджено гофровані оболонки з різною кількістю гофрів та різними варіантами жорсткого закріплення. Розраховано частоти вільних коливань оболонок різної товщини. Визначено методом стробоголографічної інтерферометрії частоти і форми вільних коливань товстостінної оболонки, які підтверджують чисельні розрахунки.

Результати та висновки дисертаційної роботи повністю відповідають меті та поставленим завданням, реферат дисертації є ідентичним положенням роботи і достатньо повно і адекватно відображає основний зміст.

Актуальність теми дисертації. Оболонкові конструкції є оптимальним інженерним рішенням, оскільки поєднують мінімальну вагу з необхідною міцністю та жорсткістю. В умовах зростаючої інтенсивності зовнішніх навантажень усе ширшого застосування набувають конструкції у вигляді нетонких і товстостінних пластин та оболонок некругового поперечного перерізу. Потреба у створенні конструкцій із підвищеними вимогами до міцності й довговічності за умови мінімального використання матеріалів і зниження витрат на виготовлення та експлуатацію актуалізує проблему їх оптимального проектування. Відсутність достатньо точних і надійних методів розв'язання задач динаміки багатокутних пластин і некругових оболонок із конструктивною неоднорідністю зумовлює необхідність розробки нових та вдосконалення існуючих методів визначення частот і форм вільних коливань пружних тіл зазначених класів. Такі методи повинні забезпечувати отримання числових значень частот і ілюстрацій форм коливань з високим ступенем точності в широких діапазонах зміни геометричних і механічних характеристик за різних варіантів граничних умов. Крім того, актуальним є розширення класу задач, розв'язання яких можливе із застосуванням запропонованих в дисертації методів. Все це зумовлює актуальність та важливість розвитку чисельного та

експериментального аналізу вільних коливань багатокутних пластин і циліндричних оболонок з конструктивною неоднорідністю.

Обґрунтованість результатів дисертації забезпечується застосуванням обґрунтованих чисельних методів і критерію практичної збіжності отриманих результатів; коректністю проведення експериментів та вимірювань; фізично правдоподібною інтерпретацією отриманих результатів; порівняльним аналізом точності та узгодженням результатів отриманих різними методами; чисельними розв'язками тестових задач.

Наукова новизна результатів роботи. Здобувачем розвинено чисельний підхід на основі методу скінченних елементів для розрахунку частот та форм вільних коливань ізотропних багатокутних пластин з отвором і без та замкнутих і незамкнутих циліндричних оболонок різного поперечного перерізу, різної товщини, з різними варіантами граничних умов.

Розроблено комбінований підхід для розрахунку частот вільних коливань ізотропних багатокутних пластин різної товщини на основі модифікованої формули для розрахунку частот вільних коливань ізотропної прямокутної пластини та розраховані методом скінченних елементів коефіцієнти для кожної багатокутної пластини з різними граничними умовами, які залежать від співвідношення товщини до сторони пластини;

Розвинено експериментальний підхід на основі резонансного методу та створено віброкомплекс для демонстрації коливань в реальному часі та визначення з достатнім ступенем достовірності частот і форм вільних коливань багатокутних пластин;

Розвинено експериментальний підхід на основі стробогологафічної інтерферометрії та створено стробокомплекс для визначення частот і форм вільних коливань багатокутних пластин та товстостінних циліндричних оболонок, який в реальному часі демонструє коливання поверхні пружного тіла у вигляді інтерференційних картин, дає можливість змінювати режим віброзбудження та амплітуду коливань, з високим ступенем достовірності досліджувати спектр частот і форм вільних коливань;

Проведено аналіз вільних коливань широкого класу пластин і оболонок з різною конструктивною неоднорідністю та отримано нові результати у вигляді числових значень частот та ілюстрацій форм вільних коливань, проведено порівняння результатів отриманих за допомогою різних підходів;

На основі результатів отриманих чисельним та експериментальними підходами проведено аналіз особливостей динамічних характеристик широкого класу пластин і оболонок, виявлені закономірності впливу геометричних параметрів, фізико-механічних характеристик матеріалу та граничних умов на спектр частот і форм вільних коливань кожного з розглянутих пружних тіл.

Практичне значення отриманих результатів та розвинених підходів полягає у можливості їх застосовувати при розв'язанні широкого класу практичних задач визначення динамічних характеристик вільних коливань пластинчастих та оболонкових елементів з різною конструктивною неоднорідністю; розвинений чисельний підхід дає можливість отримувати достовірну інформацію про спектр частот і форм вільних коливань елементів конструкції в умовах максимально

наближених до реальних умов експлуатації без значних затрат коштів та часу, змінюючи різні параметри, обирати оптимальні геометричні розміри, економічно вигідні матеріали та способи закріплення для забезпечення міцності, стійкості та надійності конструкції; розроблений комбінований підхід дає можливість швидко визначити частоти і форми вільних коливань багатокутних пластин різної товщини з різними граничними умовами; розвинені експериментальні підходи дають можливість в реальному часі демонструвати вільні коливання пружних тіл, а одержані результати застосовувати для оцінки результатів, отриманих різними теоретичними методами.

Деякі отримані результати впроваджено в розрахункову практику державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля», а також використано в рамках виконання цільової програми з оборонної тематики.

Зауваження.

1. В огляді літератури з даної тематики представлено значну кількість публікацій, які ґрунтовно висвітлюють проблему визначення частот і форм вільних коливань пластин і оболонок. Водночас, у ньому відсутні посилання на роботи, присвячені дослідженню плерарних коливань пластин, що було б доречним у контексті дисертаційного дослідження.

2. Автором розглянуті незамкнуті циліндричні оболонки еліптичного поперечного перерізу сталої та змінної товщини з різним кутом розкриття відносно великої та малої напівосей. Доцільно було б розглянути розкриття з різним кутом відносно інших прямих, наприклад, відносно прямої лінії, яка проходить через центр еліпса та має кут нахилу 45^0 відносно малої напіввісі.

3. На рис. 3.3, 3.6 та рис. 7.2, 7.3, які відображають збіжність першої і десятої частот при різних типах елементів для пластин та оболонок відповідно, необхідно провести нормування по шкалі частот для відповідних перших і десятих частот пластин і оболонок, оскільки складається хибне представлення про збіжність частот.

4. В сьомому розділі дисертації описано, що для проведення експериментального дослідження було виготовлено товстостінну оболонку разом з масивним тілом, яке в подальшому закріплювалось у затискному пристрої на масивній плиті з амортизаційним підвісом, в свою чергу при скінченно-елементному моделюванні масивне тіло не моделювалось. Із тексту дисертаційної роботи недостатньо чітко зрозуміло, яким чином нехтування масивним тілом при моделюванні впливає на результати розрахунку частот вільних коливань, отримані методом скінченних елементів.

Зазначені зауваження не знижують загальної позитивної оцінки результатів, отриманих у дисертаційній роботі, та можуть бути розглянуті як рекомендації для подальших досліджень автора.

Тема, зміст та результати дисертації відповідають паспорту спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Дисертаційне дослідження М.Ю. Борисенка є повноцінною завершеною науковою працею, що містить комплекс результатів, які становлять вагомий внесок у розвиток механіки пластин і оболонкових систем у межах механіки деформівного твердого тіла.

Вважаю, що дисертаційна робота виконана на високому науковому рівні. В ній розв'язана важлива актуальна наукова проблема. Дисертація має суттєву наукову та практичну новизну і відповідає вимогам п.7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук» затверджених постановою КМ № 1197 від 17.11.2021 р., а її автор Максим Юрійович Борисенко заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент
декан будівельного факультету
Київського національного університету
будівництва і архітектури,
доктор технічних наук, професор



Григорій ІВАНЧЕНКО

Підписав *Григорій І. Іванченко*
Секретар *Григорій І. Іванченко*
М.О.Килишенко

