

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Подворного Андрія Володимировича**
«Деформування, динаміка та стійкість конструктивно анізотропних циліндричних
оболонки в просторовій постановці»

представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за
спеціальністю 05.23.17 – Будівельна механіка

Актуальність дисертаційної роботи.

В сучасних умовах широкого застосування в авіаційній, ракетній та космічній галузях, машинобудуванні та будівництві знаходять анізотропні оболонкові конструкції. Проблеми зниження матеріаломісткості, підвищення несучої здатності таких конструкцій та елементів з них пов'язані з необхідністю вибору конструкційних матеріалів і розрахункових моделей, які б адекватно описували складні явища і процеси, що виникають при силових, температурних та динамічних впливах.

Розрахунки оболонкових конструкцій щодо встановлення параметрів деформування, динаміки та стійкості, які здійснюються на основі двовимірних моделей не завжди відповідають вимогам стосовно їх точності. Це пов'язане з використанням гіпотез, якими повинні бути враховані деформації поперечного зсуву та обтиснення товстостінних і нетонких оболонкових систем під силовим, температурним або динамічним зовнішнім впливом. Підхід який дозволяє враховувати подібні вимоги пов'язаний із використанням просторових співвідношень лінійної теорії пружності. Відомо, що при виготовленні оболонкових конструкцій сучасної техніки широко використовуються волокнисті композитні матеріали. При виготовленні оболонки перехресним укладанням на оправку такого композиту, виникає розбіжність між головними напрямками пружності використовуваного ортотропного матеріалу та осями криволінійної системи координат конструкцій. Утворений матеріал оболонки необхідно

розглядати як анізотропний, що має одну площину пружної симетрії паралельну серединній поверхні.

Розрахунки товстостінних та нетонких анізотропних оболонок, в просторовій постановці, стосовно встановлення параметрів деформування, динаміки та стійкості, здійснюються на основі ортотропної моделі композитного матеріалу, що не завжди задовольняє сучасним вимогам щодо точності. Тому для забезпечення відповідності цим вимогам в дисертаційній роботі запропоновані методи та алгоритми розрахунку анізотропних конструкцій з використанням математичних моделей, що більш повно враховують особливості такого матеріалу. Адже згідно з узагальненим законом Гука для нього взаємопов'язані деформації розтягу і зсуву, згину та кручення. З погляду на це, розв'язок задач з встановлення параметрів напружено-деформованого стану, динаміки товстостінних і стійкості нетонких анізотропних оболонок є більш складним, ніж ізотропних чи ортотропних.

Загалом, необхідно зауважити, що розв'язання задач щодо визначення параметрів напружено-деформованого стану, динаміки та стійкості анізотропних циліндричних оболонок становить основу прогнозу надійного функціонування конструкцій елементами яких вони. Тому розв'язок задач розрахунків параметрів напружено-деформованого стану (НДС), динаміки товстостінних та стійкості нетонких анізотропних циліндричних оболонок являє собою актуальну та важливу проблему як для розвитку аналітичних і чисельних методів до розрахунків нових задач механіки, так і їх практичного інженерного використання в елементах сучасної техніки.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації базуються на:

- коректній постановці мети та задач дослідження, виборі об'єкта дослідження;
- аналізі вітчизняних та зарубіжних літературних джерел з розглядуваних питань;

- надійних аналітичних та чисельних підходах, що використані для зменшення розмірності тривимірних систем рівнянь та на відомому, що достатньо добре себе зарекомендував, методі чисельного інтегрування при розв'язку однорідних і неоднорідних систем диференціальних рівнянь;

- співставленні результатів отриманих за запропонованим підходом із даними інших досліджень.

Наукова новизна роботи полягає в наступному.

- представлено підхід до отримання тривимірних систем диференціальних рівнянь теорії пружності анізотропного тіла, які дозволяють визначати параметри НДС, стійкості та вільних коливань конструктивно анізотропних шаруватих циліндричних оболонкових конструкцій, що спирається на модифікацію варіаційного принципу Ху – Васідзу;

- для приведення тривимірних систем диференціальних рівнянь до одновимірних використано аналітичний метод Бубнова – Гальоркіна при розкладенні компонент НДС в тригонометричні ряди;

- одновимірні системи диференціальних рівнянь за радіальним напрямком циліндричних оболонок розв'язані при використанні методу дискретної ортогоналізації;

- використовуючи розроблені підходи проведено дослідження та аналіз НДС товстостінних шаруватих анізотропних циліндрів від силового, температурного та термосилового впливу та параметрів їх вільних коливань. В якості матеріалу оболонок розглянуто композитні волокнисті та функціонально-градієнтні матеріали, що можуть проявляти анізотропні властивості в осях циліндричної системи координат;

- розв'язано та проаналізовано нові задачі стійкості нетонких конструктивно анізотропних циліндричних оболонок з композитних волокнистих та функціонально-градієнтних матеріалів, що можуть проявляти анізотропні властивості в осях циліндричної системи координат.

Структура та зміст дисертації. У вступі проведено обґрунтування актуальності дисертаційної роботи, представлено її зв'язок із науковими програмами, планами, темами, що виконувались за дорученням Міністерства освіти і науки України. Поставлена мета та вказані завдання, які необхідно виконати. Описані методи дослідження за допомогою яких досягається поставлена мета. Представлена наукова новизна одержаних результатів та обґрунтована їх достовірність і практична цінність.

В огляді літератури аналізується стан досліджень з визначення параметрів напружено-деформованого стану, стійкості та вільних коливань оболонкових конструкцій в тривимірній постановці та приводиться обґрунтування мети дисертаційної роботи.

В першому розділі представлено підхід до побудови тривимірної системи диференціальних рівнянь руху лінійної теорії пружності на основі модифікації варіаційного принципу Ху – Васідзу. Отримана система може бути використана для розрахунку напружено-деформованого стану від силової, температурної та термосилової дій, а також знаходження частот вільних коливань анізотропних шаруватих товстостінних композитних циліндричних оболонок.

В другому розділі завдяки використанню аналітичного методу Бубнова – Гальоркіна у випадку розподіленого бокового тиску та методу прямих при осьовому тиску та крученні представлено підходи щодо зменшення розмірності тривимірної системи диференціальних рівнянь рівноваги отриманих з просторової системи рівнянь руху та приведення її до одновимірних для кожного випадку силового навантаження. Розв'язок одновимірних систем диференціальних рівнянь, в напрямку перпендикулярному до поздовжньої осі циліндричних оболонок, проведено за використанням чисельного методу дискретної ортогоналізації. Проведено дослідження та проаналізовано результати НДС конструктивно анізотропних товстостінних шаруватих циліндричних оболонок під вказаними видами навантажень при різних типах граничних умов на їх торцях.

В третьому розділі представлено підхід до розв'язку, в просторовій постановці, задач напружено-деформованого стану анізотропних оболонкових

конструкцій під розподіленим боковим тиском та змінним, за товщиною, температурним полем, що базується на використанні процедури аналітичного методу Бубнова – Гальоркіна уздовж твірної та за коловим напрямком циліндричної оболонки і числового методу дискретної ортогоналізації в радіальному. В якості матеріалу циліндричної оболонки розглядається волокнистий композит боропластик, захищений з боку температурного поля високої інтенсивності шаром функціонально-градієнтного матеріалу. В якості ФГМ вибрано два склади матеріалів: перший – кераміко-металевий, другий – нанокерамічний ФГМ. Водночас, нанокерамічний ФГМ утворений шляхом армування керамічної матриці вуглецевими нанотрубками, які, в розглядуваній роботі, можуть змінювати свою орієнтацію відносно твірної циліндра, що веде до утворення шару ФГМ з однією площиною пружної симетрії паралельною серединній поверхні конструкції.

В четвертому розділі, на основі тривимірної системи диференціальних рівнянь руху лінійної теорії пружності, при використанні аналітичного методу Бубнова – Гальоркіна, представлено підхід до отримання одновимірної нескінченної системи звичайних диференціальних рівнянь, що дозволяє визначати частоти вільних коливань товстостінних конструктивно анізотропних циліндричних оболонок. Проведено розрахунки та здійснено аналіз результатів визначення частот вільних коливань в просторовій постановці для таких оболонок з волокнистих композитів та з функціонально-градієнтних матеріалів в залежності від зміни товщини та довжини циліндрів, зміни структури шаруватих пакетів та кута їх армування.

В п'ятому розділі на основі модифікованого варіаційного принципу Ху – Васідзу приведено підхід до побудови просторової системи однорідних диференціальних рівнянь стійкості в частинних похідних теорії пружності анізотропного тіла, що виведена в циліндричній системі координат. За використанням аналітичного методу Бубнова – Гальоркіна та чисельного методу дискретної ортогоналізації запропоновано підхід до її розв'язку. При цьому для встановлення напружень, що описують докритичний НДС при осьовому тиску та

розподіленому торцевому зсувному навантаженні (крученні), використано чисельний метод прямих із процедурою аналітичного методу Бубнова – Гальоркіна, а також метод дискретних перетворень Фур'є.

Шостий розділ присвячено дослідженню в просторовій постановці впливу різних схем армування, конфігурації пакетів шарів і геометрії на стійкість нетонких конструктивно анізотропних циліндричних оболонкових конструкцій при розподіленому боковому тиску, осьовому тиску та крученні.

Достовірність отриманих результатів забезпечена співставленням результатів розв'язку задач про напружено-деформований стан, стійкість та частоти вільних коливань анізотропних циліндричних оболонкових конструкцій з даними приведеними в науковій літературі, що отримані при використанні відомих двовимірних та тривимірних моделей розв'язаних аналітичними або чисельними методами.

Практична цінність одержаних результатів і рекомендації щодо їх використання полягає в розробці математичної моделі і на її основі чисельних і аналітичних методів розрахунку НДС, частот вільних коливань товстостінних і стійкості нетонких пружних анізотропних циліндричних оболонок обертання при різноманітних силових та температурних діях. Дана оцінка впливу на параметри напружено-деформованого стану, стійкості і частот вільних коливань анізотропії матеріалу, геометрії конструкцій, структури за товщиною та умов закріплення торців анізотропних шаруватих циліндричних оболонок обертання. Розроблений підхід до розрахунку конструктивно анізотропних циліндричних оболонок впроваджено в ДП «Антонов» м. Київ, а також при виконанні держбюджетних тем на замовлення МОН України

Повнота викладу результатів дослідження в наукових публікаціях, що можуть бути зарахованими за темою дисертації.

Результати дисертаційної роботи опубліковані в 38 наукових виданнях. З них вісім робіт в наукових періодичних видання, що індексуються наукометричними базами Scopus та Web of Science, п'ятнадцять статей в фахових журналах категорії «Б» відповідно до наказу МОН України, три в закордонних фахових журналах; одинадцять тез доповідей опублікованих у збірниках матеріалів та доповідей українських і міжнародних наукових конференцій та одна монографія. Публікації в достатній мірі висвітлюють результати виконаних досліджень.

Зауваження та пропозиції до дисертаційної роботи:

1. З тексту роботи незрозуміло, чому у випадку дії бокового тиску зменшення розмірності тривимірної розв'язувальної системи диференціальних рівнянь проводиться за допомогою методу Бубнова – Гальоркіна, а у випадку дії навантажень на торцях оболонки застосовується метод прямих?
2. Чому в роботі задачі стійкості розглядаються тільки для нетонких циліндричних анізотропних оболонок? Тонкостінні оболонки не розглядались.
3. При розв'язанні задач стійкості, автором не проаналізовано, чи можуть в оболонкових конструкціях виникати напруження більші за межу міцності матеріалу при навантаженнях менших за критичні?
4. У роботі не приведено співставлення хоча б деяких результатів, наприклад, розрахунку напружено-деформованого стану товстостінних анізотропних циліндричних оболонок, що отримані автором при використанні запропонованого підходу, з розрахунками, які можуть бути здобуті методом скінчених елементів.

Викладені зауваження не зменшують цінності основних наукових положень, висновків і рекомендацій, що захищаються дисертантом, і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Загальний висновок по дисертаційній роботі

Дисертаційна робота Подворного Андрія Володимировича є завершеним науковим дослідженням. Сформульовані в роботі наукові положення, висновки і рекомендації достатньо обґрунтовані, а їхня достовірність і новизна не викликають сумніву. Зміст реферату повністю відповідає тексту дисертації.

За напрямом обраних і вирішених питань дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.23.17 – Будівельна механіка.

Таким чином, за об'ємом, змістом, рівнем та оформленням в цілому дисертаційна робота Подворного Андрія Володимировича «Деформування, динаміка та стійкість конструктивно анізотропних циліндричних оболонок в просторовій постановці» виконана на рівні вимог до докторських дисертацій відповідно до п.п. 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197, а її автор, Подворний Андрій Володимирович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.17 – Будівельна механіка.

Офіційний опонент

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри опору матеріалів
та машинознавства

Національного транспортного університету

О.В. Марчук

ПІДПИС ЗАВІРЯЮ
Вчений секретар Національного
Транспортного Університету
проф. Мельниченко О.І. 29.05.2022

