

В І Д Г У К

офіційного опонента,
доктора технічних наук, професора,
професора кафедри математики та інформатики Державного закладу
«Луганський національний університет імені Тараса Шевченка» (м. Полтава)
Козуба Юрія Гордійовича.

на дисертаційну роботу Подворного Андрія Володимировича
«**Деформування, динаміка та стійкість конструктивно анізотропних
циліндричних оболонок в просторовій постановці**»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.23.17 – Будівельна механіка

Ступінь актуальності обраної теми

Аналіз стану досягнень в галузі механіки композитних матеріалів та оболонкових конструкцій, виготовлених з них, вказує на наявність добре відпрацьованих методів розв'язку задач мікромеханіки регулярних структур, методів визначення приведених характеристик еквівалентних ізотропних та ортотропних матеріалів, розрахункових моделей шаруватих пластин та оболонок стосовно задач деформування, динаміки та стійкості, які викликають значний інтерес як з наукової, так і з практичної точок зору.

Серед цих задач важливими і такими, що представляють практичний інтерес є задачі дослідження напружено-деформованого стану як від силового так і температурного впливів, стійкості та питання визначення частот вільних коливань анізотропних оболонкових конструкцій з композитних та функціонально-градієнтних матеріалів. Водночас при розв'язку подібних задач для нетонких та товстостінних оболонок виникає необхідність отримувати результати без використання гіпотез, як це притаманно двовимірним класичним та уточненим методикам. Таким вимогам відповідають просторові співвідношення теорії пружності.

В сучасних умовах, широкого використання при виготовленні різноманітних елементів конструкцій набувають композитні матеріали. При виготовленні оболонкових систем з волокнистих композитів шляхом їх намотування на оправки виникає розбіжність між головними напрямками пружності ортотропного матеріалу та осями криволінійної системи координат оболонок. Матеріал таких конструкції в осях оболонки необхідно розглядати як такий, що має одну площину пружної симетрії, яка є паралельною до

серединної поверхні оболонки, що значно ускладнює підходи до розв'язку просторових задач теорії анізотропних циліндричних оболонкових конструкцій.

З погляду на це представлений в роботі розрахунковий підхід для розв'язку задач напружено-деформованого стану, динаміки та стійкості циліндричних конструктивно анізотропних оболонок, що спирається на просторові співвідношення теорії пружності є актуальним та таким, що має важливе наукове та прикладне значення.

Мета і завдання дослідження

У зв'язку із широким використанням композитних матеріалів при виготовленні оболонкових конструктивних елементів сучасної техніки постає питання створення надійних підходів до їх розрахунку. Це питання стає особливо актуальним у випадку дослідження деформування та динаміки товстостінних і стійкості нетонких конструктивно анізотропних циліндричних оболонок з композитних та функціонально-градієнтних матеріалів.

Метою роботи є створення розрахункових моделей, що дозволять провести дослідження напружено-деформованого стану, вільних коливань та стійкості циліндричних оболонкових конструкцій при врахуванні низького порядку симетрії композитів.

Предметом дослідження є параметри лінійного напружено-деформованого стану анізотропних товстостінних циліндричних оболонок, виготовлених з матеріалу з однією площиною пружної симетрії, під дією: механічних, теплових навантажень; параметри вільних коливань та характеристики критичних навантажень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Роботу виконано згідно з планами держбюджетної тематики Національного університету водного господарства та природокористування на замовлення Міністерства освіти і науки України за такими темами, як:

«Розв'язання задач нелінійної механіки анізотропних композитних і нанокомпозитних оболонок обертання в уточнених постановках» (№ ДР 0113U004051); «Розв'язання задач нелінійної механіки анізотропних композитних і нанокомпозитних оболонок в уточненій та тривимірній постановках» (№ ДР 0117U000654); «Науково-технічні аспекти розробки математичних моделей і реалізація на їх основі методик розрахунку конструкцій з композитних матеріалів» (№ ДР 0199U001924); «Розробка теоретичних основ розрахунку статично-невизначених конструкцій з

композитних матеріалів при різних режимах навантаження» (№ ДР 0101U001892); «Розробка змішаного варіаційного принципу та методів розв'язання нелінійних задач механіки композитних оболонок» (№ ДР 0107U004177); «Побудова канонічної системи рівнянь нелінійної теорії анізотропних оболонок типу Тимошенка і методів розв'язання задач стійкості оболонок з композитів» (№ ДР 0110U000818).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і здобутих результатів забезпечена коректністю постановки задачі, використанням надійних та перевірених чисельних та аналітичних методів розв'язання систем диференціальних рівнянь, дослідженням збіжності отриманих результатів, порівнянням здобутих результатів з опублікованими даними досліджень інших авторів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у створенні розрахункової моделі та проведенні досліджень напружено-деформованого стану від силового та температурного впливів, а також стійкості та частот вільних коливань конструктивно анізотропних циліндричних оболонок виготовлених з композитних та функціонально-градієнтних матеріалів із однією площиною пружної симетрії.

При цьому вперше для виведення тривимірних систем диференціальних рівнянь в частинних похідних, що описують напружено-деформований стан, стійкість та частоти вільних коливань було використано модифікований варіаційний принцип Ху – Васідзу.

Вперше розв'язок отриманих тривимірних систем диференціальних рівнянь шляхом приведення їх до одновимірних проводиться при використанні аналітичного методу Бубнова – Гальоркіна, а також чисельного методу прямих у випадку дослідження напружено-деформованого стану при осьовому тиску та торцевому рівномірно розподіленому зусиллі (крученні). Одновимірні системи диференціальних рівнянь розв'язуються при використанні чисельного методу дискретної ортогоналізації за радіальним напрямком циліндричної оболонки.

Вперше створено відповідні програмні комплекси і на цій основі встановлені параметри напружено-деформованого стану, визначені частоти вільних коливань та розв'язані нові задачі стійкості товстостінних та нетонких конструктивно анізотропних шаруватих циліндричних оболонкових конструкцій в умовах силового, температурного, термосилового впливу.

Отримано нові дані про вплив граничних умов, структури шаруватих пакетів, кутів її армування та геометрії конструкції на параметри напружено-деформованого стану, коливань та стійкості циліндричних оболонок.

Повнота викладення результатів досліджень у наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації

За результатами дисертаційної роботи опубліковано 38 наукових праць, серед яких: вісім статей, що індексуються в наукометричних базах Scopus та Web of Science; п'ятнадцять статей у фахових журналах, що входять до переліку, затвердженого ДАК України категорії "Б"; три статті у закордонних фахових журналах; одинадцять публікацій у збірниках матеріалів та доповідей українських та міжнародних наукових конференцій та одна монографія видана у співавторстві.

Реферат дисертації за змістом і викладом відповідає дисертаційній роботі.

Структура і обсяг дисертації

Робота складається з вступу, огляду літератури, шести розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 324 найменувань, додатків.

У **вступі** обґрунтована актуальність роботи, сформульована мета та поставлені завдання для її досягнення, визначені наукова новизна роботи та її практична цінність.

Огляд літератури містить короткий огляд і аналіз досліджень напружено-деформованого стану, стійкості та вільних коливань композитних циліндричних оболонок в просторовій постановці, виконаних різними авторами.

Перший розділ містить метод побудови системи диференціальних рівнянь руху просторової лінійної теорії пружності для товстостінних циліндричних анізотропних оболонок. Представлений підхід ґрунтується на модифікації варіаційного принципу Ху – Васідзу, що дозволяє записувати відповідні рівнянням в тривимірній постановці граничні умови та співвідношення закону Гука. За використанням отриманої системи і відповідних їй граничних умов можуть бути встановлені величини напружень і переміщень від силової та температурної дій, в просторовій постановці при різних видах граничних умов на торцях товстостінної шаруватої анізотропної циліндричної оболонки з композитних та функціонально-градієнтних матеріалів.

У другому розділі представлений підхід, що базується на використанні процедури аналітичного методу Бубнова – Гальоркіна, щодо зменшення розмірності тривимірної системи диференціальних рівнянь рівноваги, отриманих з просторової системи рівнянь руху шляхом нехтування доданками, що враховують температурну дію та частоту вільних коливань. У випадку дії на оболонки розподіленого бокового тиску, в пропонованому підході, використано розкладення функцій напружень і переміщень в подвійні тригонометричні ряди Фур'є за коловим напрямком та уздовж твірної циліндричної оболонки так, щоб вони задовольняли умовам на торцях. Для випадків осьового тиску та розподіленого по торцях зсувного навантаження (кручення) запропоновано підхід до зменшення розмірності тривимірної системи рівнянь рівноваги, отриманих з системи рівнянь руху, що включає в себе припущення про незмінність параметрів НДС циліндричної оболонки в коловому напрямку та використання методу прямих уздовж твірної зазначеної конструкції. Отримані нормального виду Коші одновимірні системи рівнянь дозволяють визначати компоненти напружено-деформованого стану від силової дії на товстостінні анізотропні шаруваті циліндричні оболонкові конструкції. Розв'язок одновимірних розв'язуючих систем диференціальних рівнянь проводиться за радіальним напрямком при використанні числового методу дискретної ортогоналізації.

На цій основі проведені дослідження в просторовій постановці напружено-деформованого стану товстостінних конструктивно анізотропних циліндричних оболонок з волокнистих композитів, що знаходяться під дією: розподіленого бокового, осьового тисків, розподіленого по торцю зсувного навантаження (кручення) та мають чотири види граничних умов на торцях.

В третьому розділі наведено підхід щодо зменшення розмірності тривимірної системи диференціальних рівнянь рівноваги, отриманих з просторової системи рівнянь руху шляхом нехтування доданками, що враховують частоту вільних коливань, у випадку температурної та термосилової дії. Отримана нормального виду одновимірна система рівнянь дозволяє визначати компоненти напружено-деформованого стану від температурної та термосилової дії товстостінних анізотропних циліндричних оболонок. Проведено дослідження та проаналізовано напружено-деформований стан від температурної та термосилової дії в просторовій постановці товстостінної анізотропної циліндричної оболонки виготовленої з

композитного матеріалу, який захищений з боку високотемпературного поля шаром кераміко-металевого або нанокерамічного функціонально-градієнтного матеріалу. При цьому, вперше розглянуто випадок зміни кута орієнтації армуючих кераміку нанотрубок відносно твірної, що веде до утворення шару функціонально-градієнтного матеріалу з однією площиною пружної симетрії паралельною серединній поверхні оболонки.

У четвертому розділі представлено підхід, що базується на використанні аналітичного методу Бубнова – Гальоркіна до отримання нескінченної одновимірної системи диференціальних рівнянь, з просторової системи рівнянь руху, що виведена за використанням модифікованого варіаційного принципу Ху – Васідзу. Отримана система диференціальних рівнянь дозволяє визначати частоти вільних коливань товстостінних шаруватих анізотропних циліндричних оболонкових конструкцій з волокнистих композитів та з функціонально-градієнтних матеріалів, які також можуть проявляти анізотропні властивості в осях криволінійної циліндричної системи координат, при різних видах граничних умов на торцях, схемах армування оболонок, конфігурації пакету шарів і геометрії конструкцій.

П'ятий розділ присвячено методу отримання тривимірної системи диференціальних рівнянь стійкості анізотропних нетонких циліндричних оболонок при використанні модифікованого варіаційного принципу Ху – Васідзу. Приведення отриманої системи до одновимірної нескінченної системи звичайних диференціальних рівнянь проводиться при використанні аналітичного методу Бубнова – Гальоркіна та, у випадку осьового стиску та кручення, методу дискретних перетворень Фур'є.

В шостому розділі проведено дослідження в просторовій постановці стійкості нетонких анізотропних циліндричних оболонок, виготовлених з волокнистих композитних і функціонально-градієнтних матеріалів з однією площиною пружної симетрії паралельною серединній поверхні конструкції, що знаходяться під дією: розподіленого бокового, осьового тисків, розподіленого по торцю зсувного навантаження (кручення).

У висновках наведено чітко сформульовані новизна, теоретична і практична цінність результатів дисертаційної роботи.

Практичне значення результатів роботи і використання результатів досліджень.

Розроблена методика реалізована у вигляді програмного забезпечення, яке може застосовуватись в наукових і проектно-конструкторських установах для дослідження процесів деформування та руйнування просторових тіл і, як наслідок, прогнозування ресурсу їх роботи.

Результати дисертації впроваджені в Державному підприємстві «АНТОНОВ» для обґрунтування і оптимізації вибору перспективних конструкцій, проектуванні та розрахунку на стійкість композитних елементів літальних апаратів.

Розроблені підходи стосовно встановлення параметрів напружено-деформованого стану, методики встановлення характеристик, що описують вільні коливання оболонкових конструкцій використовуються у навчальному процесі підготовки інженерів-будівельників.

До виконаної автором дисертаційної роботи, є такі запитання або зауваження:

1. У дисертаційній роботі створено комп'ютерний програмний комплекс, в якому в єдиному процесі поєднано встановлення параметрів докритичного напружено-деформованого стану та розв'язок нових задач стійкості нетонких анізотропних циліндричних оболонок. Хотілося б щоб автор конкретизував зміст алгоритму поєднання в обчислювальному процесі знаходження параметрів докритичного стану та величин критичних навантажень.

2. Було б доцільно більш детально обґрунтувати вибір методу прямих при розв'язуванні задач про напружено-деформований стан товстостінних циліндричних оболонок при осьовому тиску чи крученні.

3. В третьому розділі розглядаються фізико-механічні характеристики функціонально-градієнтних матеріалів та їх залежності від температури. Було б доцільно вказати межі інтервалу температур при яких вони використовуються.

4. У диференціальних рівняннях, що описують стійкість, містяться докритичні напруження позначені зверху нульовим індексом. Такі ж позначення використовуються для умов на бічних поверхнях циліндричної оболонки у розрахунках про її докритичний напружено-деформований стан. Повстає питання, чи йдеться про одні й ті ж напруження?

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

Висновки опонента

Дисертаційна робота Подворного Андрія Володимировича є завершеним науковим дослідженням. Сформульовані в роботі наукові положення та висновки достатньо обґрунтовані, а їхня достовірність і новизна не викликають сумніву.

Зміст реферату повністю відповідає тексту дисертації.

За напрямом обраних і вирішених питань дисертаційна робота «Деформування, динаміка та стійкість конструктивно анізотропних циліндричних оболонок в просторовій постановці» відповідає паспорту спеціальності 05.23.17 – будівельна механіка і профілю Спеціалізованої вченої ради Д 26.056.04. Вона відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України до докторських дисертацій, наведених у п. 7-9 «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,
професор кафедри математики та інформатики
Державного закладу «Луганський національний
університет імені Тараса Шевченка»

Юрій КОЗУБ

Підпис д.т.н., проф. Ю. Г. Козуба засвідчую
учений секретар Державного закладу

«Луганський національний університет
імені Тараса Шевченка»

кандидат історичних наук, доцент



Ольга ДРОБИШЕВА