

Відгук офіційного опонента  
на дисертаційну роботу Яремченка Сергія Миколайовича «**Чисельний аналіз  
стационарного деформування циліндрів та куль неоднорідної  
структурі на основі різних моделей**»,  
подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук  
за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Широке застосування товстостінних оболонкових конструкцій циліндричної і сферичної форм в різних галузях сучасної техніки визначається вимогами міцності та надійності, технологічними особливостями, економічною ефективністю та іншими обставинами, які приводять до ускладнення геометричної та фізичної структур оболонок.

В багатьох випадках циліндричні та сферичні оболонкові конструкції залежно від їх функціонального призначення і умов експлуатації мають складний контур поперечного перерізу, змінну товщину та інші особливості. Прикладами такими конструкцій є захисні покриття атомних реакторів, сховища різного призначення, корпуси надводних і підводних кораблів, літальних і космічних апаратів, об'єкти інженерної і хімічної промисловості. Тому можна зробити висновок, що дослідження стационарного деформування товстостінних неоднорідних циліндрических оболонок і куль на основі дискретно-континуальних і дискретних підходів є актуальною проблемою механіки деформівного твердого тіла.

Дослідження, результати яких викладено в дисертаційній роботі проведено в межах затверджених НАН України переліком найважливіших проблем фізико-математичних та технічних наук, зокрема напрямів: методи розрахунку та дослідження напружене-деформованого стану, у тому числі при наявності дефектів різного походження; механіка композитних матеріалів, включаючи нанокомпозити; науково обґрунтовані методи оцінки технічного стану та залишкового ресурсу конструкцій тривалої експлуатації. Розроблені в роботі відповідні механіко-математичні моделі, побудовані розрахункові схеми та отримані обчислювальні результати увійшли до відповідних звітів з тем науково-дослідних робіт відділу обчислювальних методів Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАНУ: НДР № 326 "Розробка чисельно-аналітичних підходів до розв'язання статичних та динамічних задач для просторових тіл і оболонок різної форми та структури з врахуванням анізотропії і неоднорідності", номер державної реєстрації 0101U002861, 2001 – 2005 pp.; НДР № 443п "Розв'язання окремих класів задач та дослідження напруженого стану і коливань пластин та оболонок складної геометрії", номер державної реєстрації 0103U005976, 2003 – 2005 pp.; НДР № 349 "Розробка методів розв'язання задач та дослідження статичного і динамічного деформування пружних тіл складної геометрії та структури на основі моделей різного рівня", номер державної реєстрації 0105U001991, 2005 – 2009 pp.; НДР № 1.3.1.358 "Розробка нових нетрадиційних підходів на основі дискретно-континуальних методів і комбінованих моделей до дослідження деформування і руйнування композитних матеріалів для розв'язання проблем міцності і довговічності сучасних конструкцій", номер державної реєстрації 0107U000345, 2007 – 2011 pp.; НДР № 1.3.1.370 "Розробка нових підходів до дослідження деформування складних оболонкових систем з неоднорідних анізотропних матеріалів при різних видах навантаження на основі методів чисельного аналізу", номер державної реєстрації 0109U004184, 2009 – 2013 pp.; НДР № 1.3.1.382 "Дослідження механічної поведінки неоднорідних анізотропних елементів сучасних конструкцій складної

структурі за допомогою нових підходів на основі різних моделей", номер державної реєстрації 0112U000249, 2012 – 2016 рр.; НДР № 1.3.1.401 "Чисельний аналіз впливу конструктивної та структурної неоднорідності анізотропних оболонкових структур на їх стаціонарне деформування", номер державної реєстрації 0115U005709, 2016 – 2020 рр., НДР № 1.3.1. 410 «Динамічне деформування елементів конструкцій сучасного машинобудування та стійкість і досяжність множин траекторій механічних систем», номер державної реєстрації 0117U000700, 2017 – 2021 рр.

**Новизна** викладених у дисертаційній роботі результатів полягає в наступному:

- виконано постановку та побудовані розрахункові схеми ряду нових задач про стаціонарне деформування циліндричних тіл з різним поперечним перерізом та тіл сферичної форми з врахуванням їх конструктивної та структурної неоднорідності в рамках просторової та оболонкових моделей;
- розроблено нові дискретно-континуальні методики на основі методу сплайн-колокації та розвинено варіант дискретного підходу (метод скінчених елементів) для дослідження нового класу задач про НДС і коливання неоднорідних циліндричних та сферичних тіл в рамках різних моделей;
- досліджено напружено-деформований стан неоднорідних циліндричних тіл з різним поперечним перерізом та куль в рамках просторової та оболонкових моделей за допомогою розробленої методики;
- побудовано розподіли полів напружень та переміщень в залежності від характеру неоднорідності, навантаження, типу граничних умов та геометрії пружного тіла;
- на основі отриманих розв'язків проведено аналіз особливостей НДС і коливань широкого класу неоднорідних циліндричних та сферичних тіл, виявлено основні механічні закономірності щодо впливу характеру неоднорідної структури, геометричних, механічних параметрів, видів навантаження та граничних умов об'єктів, що розглядаються, на розподіл полів напружень та переміщень.

**Обґрунтованість та достовірність результатів, наведених у дисертації** забезпечується коректністю та строгістю математичних постановок задач у рамках просторової теорії пружності та теорії оболонок зі скінченною зсувиною жорсткістю; застосуванням обґрунтованих чисельних дискретно-континуальної і дискретної методик, фізично правдоподібною інтерпретацією отриманих результатів; порівняльним аналізом точності розв'язання поставлених задач на основі зазначених підходів.

**Практичне значення.** Результати роботи та підходи до їх отримання можуть бути використані при розв'язанні широкого класу практичних задач стаціонарного деформування неоднорідних конструктивних елементів сучасної техніки; розроблені програмні комплекси дають можливість отримати достовірну інформацію про розподіл полів напружень та переміщень в елементах конструкцій при різних режимах експлуатації і проведення оцінок їх міцності і надійності; багатосерійні розрахунки за розробленими програмами на етапі проектування конструкцій можуть бути альтернативою до проведення коштовних натурних експериментів.

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, шести розділів, висновку, списку використаних джерел та додатку. Текст роботи викладено на 261 сторінці. Структура, обсяг та оформлення дисертаційної роботи відповідають вимогам, які висуваються до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора наук

(наказ МОН № 40 від 12.01.2017 "Про затвердження вимог до оформлення дисертацій").

У роботі побудовано механіко-математичні моделі відповідних задач про стаціонарне деформування за уточненою теорією оболонок і просторовою теорією пружності та проведено розробку відповідних розрахункових схем. Метод сплайн-колокації було застосовано для пониження розмірності двовимірних та тривимірних краївих задач для систем диференціальних рівнянь в частинних похідних зі змінними коефіцієнтами до одновимірних задач. Отримані лінійні країві задачі для систем звичайних диференціальних рівнянь розв'язано стійким чисельним методом дискретної ортогоналізації. У задачах про напружено-деформований стан оболонок зі скісними зрізами для зведення складної геометричної області в ортогональній системі координат до прямокутної в неортогональній застосовується метод заміни змінних. Задачі у варіаційній постановці розв'язано методом скінченних елементів. Використовуються прямокутні чотири- та восьмивузлові елементи, для розв'язання двовимірних задач, а також восьми- і двадцятивузлові елементи у вигляді паралелепіпедів для розв'язання тривимірних задач. Побудовано алгоритми, які реалізовано в проблемно орієнтованих обчислювальних комплексах на сучасних персональних комп'ютерах.

Проведено дослідження НДС:

для ізотропної циліндричної оболонки в двох варіантах реалізації дискретно-континуального підходу з апроксимацією за напрямною і за твірною; для трансверсально ізотропної оболонки змінної товщини та для гофрованих пластини і циліндричних оболонок еліптичного перерізу. Показано складний характер НДС в гофрованих циліндричних оболонках і пластинах в залежності від параметрів гофрування -- амплітуди та кроку гофрів;

циліндричних оболонок кругового і еліптичного перерізів зі скісними зрізами на торцях в новій неортогональній системі координат. Проведено дослідження впливу геометричних параметрів скісного зрізу на розподіл полів переміщень. Показано, що наявність зрізів не змінює якісної картини розподілу цих полів, а кількісні зміни спостерігаються переважно в околі торців;

порожнистої кругового незамкнутого циліндра зі змінними за радіальною координатою пружними властивостями матеріалу, що знаходиться під дією нормальноготиску на бічних поверхнях і має жорстке закріплення на торцевих площинама і на площинама в відповідних перерізах; новий розв'язок задачі на основі методу сплайн-колокації з застосуванням двовимірних сплайнів за коловою координатою і координатою, що змінюється вздовж осі циліндра. Проведене порівняння одержаних результатів та результатів МСЕ з використанням скінченних елементів у вигляді паралелепіпедів з 8-ма та 20-ма вузлами показало задовільне співпадіння переміщень для різних варіантів неоднорідності матеріалу; однорідного замкнутого циліндра, поперечний переріз якого обмежений конфокальними поверхнями на основі тривимірної теорії пружності. Наведено постановку задачі про НДС циліндра з використанням еліптичної системи координат. Одержано розв'язок задачі в варіанті МСЕ, коли скінчений елемент записаний в цій же координатній системі. Показано збіжність розв'язку при збільшенні дискретизації області та неперервну залежність переміщень циліндра від ексцентриситету еліпса з граничним переходом до випадку кругового циліндра; неоднорідних куль на основі осесиметричної теорії пружності. Досліджено вплив неоднорідності матеріалу на характер розподілу полів переміщень.

Проведено дослідження вільних коливань циліндра скінченої довжини з п'єзокерамічного матеріалу на основі осесиметричної теорії електропружості. Даються нові розв'язки задачі по визначенням резонансних частот, що одержані на основі застосування методу сплайн-колокацій і методу скінчених елементів. Для наведених шести перших резонансних частот відмічена високий ступінь їх співпадіння (у межах 0,1 %), що свідчить про достовірність одержаних результатів.

Загалом, робота є завершеним науковим дослідженням. Результати, викладені в дисертації, у повній мірі оприлюднені в наукових фахових виданнях, які відповідають наказу МОН № 1112 від 17.10.2012 "Про опублікування результатів дисертації на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук".

Автореферат дисертації ідентичний за змістом з основними положеннями дисертації. Текст автореферату та дисертаційної роботи викладено на належному науковому рівні. Висновки, викладені в роботі, повністю відповідають її заявленій меті.

Результати, отримані автором у межах дисертаційної роботи, пройшли належну апробацію науковим співавторством під час доповідей за матеріалами дисертаційної роботи на ряді семінарів та наукових вітчизняних та міжнародних конференцій.

Наукові роботи, що є основою дисертації, опубліковані після захисту кандидатської дисертації. Матеріали кандидатської дисертації не входять до даної дисертаційної роботи.

В цілому, дисертаційна робота Яремченка С.М. виконана на досить високому науковому рівні і є цілісним науковим дослідженням, в якому отримані нові наукові результати, що в сукупності є вагомим внеском у вирішення актуальної наукової проблеми механіки деформівного твердого тіла, зокрема механіки оболонок та оболонкових систем. У дисертаційній роботі розв'язано актуальну наукову проблему розробка та удосконалення чисельно-аналітичних підходів для дослідження напружене-деформованого та коливань нетонких циліндричних та сферичних тіл зі складною геометрією та структурою.

Результати та висновки роботи повністю відповідають сформульованій меті та завданням роботи, а автореферат є ідентичним основним положенням дисертації і в повній мірі відображає її основний зміст. Тема, зміст та результати дисертаційної роботи відповідають паспорту спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

### **Зauważення.**

1. В підрозділі 4.2 виведено рівняння для циліндричних оболонок зі скінчими зрізами для довільного поперечного перерізу, а в 4.1 для кругових. Очевидно, рівняння з розділу 4.1 є частинним випадком рівнянь з 4.2. Було б доцільно це врахувати і показати як з загальних отримати частинний випадок. Це не зроблено.
2. В роботі проведено порівняння результатів отриманих методом сплайн-колокації і дискретної ортогоналізації і методу скінчених елементів для осесиметричних і неосесиметричних циліндрів та осесиметричних куль. Було б цікаво також порівняти розв'язки для оболонок, отримані методом сплайн-колокації та методом скінчених елементів
3. В задачі про осесиметричний напружене-деформований стан кулі спостерігається певна розбіжність у розподілах переміщень, отриманих різними методами. Було б цікаво, що відбувається з розподілами напружень

- в цьому випадку. Те ж саме стосується задач про оболонки зі скінними зрізами та тривимірних задач, описаних у шостому розділі.
4. Бажано було б зробити більш детальний порівняльний аналіз про ефективність застосування дискретно-континуальних та дискретних підходів для класу задач, що досліджується.

Втім, зазначені зауваження не стосуються актуальності проведених досліджень, наукової новизни, достовірності та практичної цінності отриманих результатів і не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи.

**Висновок.** За актуальністю теми, новизною, обсягом досліджень, практичною та теоретичною цінністю результатів, дисертаційна робота С.М. Яремченка "Чисельний аналіз стаціонарного деформування циліндрів та куль неоднорідної структури на основі різних моделей" відповідає вимогам п. 10 і п. 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р., а її автор Сергій Миколайович Яремченко за вирішення актуальної проблеми механіки оболонкових систем, заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент

завідувач кафедри теоретичної та прикладної механіки  
Київського національного університету  
імені Тараса Шевченка МОН України,  
член-кореспондент НАН України

Я.О. Жук

ПІДПІС ВАС І КУ  
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР НДЧ  
КАРДУЛЬ В. В.  
15.09.2021 р.

