

ВІДГУК

офіційного опонента д.ф.-м.н., проф. Сторожука Є.А. на дисертацію Зеленського Анатолія Григоровича «Варіант математичної теорії нетонких пружних пластин і пологих оболонок при статичному навантаженні», подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Актуальність теми дисертації.

Елементи конструкцій у вигляді нетонких пластин і оболонок різноманітної форми знаходять широке застосування в сучасній інженерній практиці. В багатьох випадках вони виготовлені з композитних матеріалів, для яких характерні шаруватість, анізотропія, низька зсувна жорсткість, поперечне обтискання, нелінійність тощо. Високі вимоги до точності і достовірності результатів досліджень з оцінкою міцності та деформативності таких елементів конструкцій вимагають залучення до їх розрахунку високоточних теорій та розробки нових ефективних математичних методів розв'язування відповідних граничних задач.

Класичні теорії типу Кірхгофа–Лява задовільно описують напружено-деформований стан (НДС) порівняно тонких пластин і оболонок, але не враховують явищ, зумовлених поперечними зсувами та обтисканням.

Застосування при дослідженні НДС нетонких пластин і оболонок неklasичних уточнених теорій типу Тимошенка, Рейснера, в яких враховуються деформації поперечного зсуву і обтискання, в деяких випадках може приводити до значних відхилень результатів розрахунків від точних розв'язків даних задач у тривимірній постановці.

Для неklasичних теорій пластин та оболонок, які базуються на аналітичних методах (асимптотичного інтегрування, однорідних розв'язків, розкладання компонент НДС по товщині у степеневі ряди, символічного інтегрування), характерне наближене задоволення граничних умов на лицевих площинах (поверхнях), що знижує їх точність.

Аналітичне розв'язання граничних задач для лінійно-пружних пластин та оболонок у тривимірній постановці пов'язане з великими математичним труднощами. Точні розв'язки вдається отримати тільки для вузького кола задач, а саме для тих випадків граничних умов і форми границі, які дають можливість розділити змінні.

Тому, зважаючи на сказане, тема дисертаційної роботи Зеленського А.Г., присвяченої побудові нових високоточних варіантів математичної теорії (МТ) нетонких фізично лінійних і нелінійних пластин та пологих оболонок при статичному навантаженні, розробці ефективних аналітичних методів розв'язання отриманих систем диференціальних рівнянь (СДР) високих порядків і дослідженню НДС даних елементів, є актуальною.

Актуальність теми дисертаційної роботи також підтверджується її відповідністю планам наукових досліджень з восьми держбюджетних тем, що виконувалися за участі автора упродовж 1997 – 2020 рр. у ДВНЗ “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації, забезпечується:

- повнотою та математичною і фізичною коректністю постановок розглянутих в роботі граничних задач;
- строгим математичним підходом до їх розв’язування з формулюванням і доведенням необхідних теорем про єдиність розв’язків граничних задач і збіжність рядів за поліномами Лежандра та за малим параметром;
- аналітичними граничними переходами, які приводять до відомих теорій пластин і оболонок;
- дослідженням практичної збіжності та точності одержаних розв’язків;
- узгодженістю розв’язків задач в окремих частинних випадках з точними результатами та відомими з літературних джерел даними, отриманими іншими авторами;
- формулюванням висновків та рекомендацій на основі отриманих аналітичних та чисельних результатів дисертаційної роботи.

У цілому можна вважати, що наукові положення, висновки та рекомендації, які представлені у дисертаційній роботі Зеленського А.Г., є обґрунтованими та достовірними.

Наукова новизна дисертаційної роботи.

До основних нових наукових результатів, отриманих у роботі, можна віднести наступне:

1) розроблено нову методологію побудови високоточних варіантів МТ однорідних і шаруватих фізично лінійних та нелінійних пластин і пологих оболонок довільної товщини при дії статичних поперечних навантажень;

2) з використанням запропонованої методології побудовані нові варіанти МТ для нетонких однорідних трансропних пластин та пологих оболонок, нетонких однорідних ортотропних і ізотропних фізично нелінійних пластин (ФНП) та пологих фізично нелінійних оболонок (ФНО), нетонких шаруватих лінійно і нелінійно пружних пластин та пологих оболонок симетричної і несиметричної структури;

3) уперше отримані в явному вигляді системи диференціальних рівнянь рівноваги (СДРР) у вищих наближеннях варіантів МТ указаних елементів, що дає можливість визначати їх НДС з високою точністю;

4) розроблено новий метод і узагальнено операторний метод зведення неоднорідних диференціальних рівнянь (ДР) з частинними похідними високих

порядків до неоднорідних ДР 2-го порядку;

5) уперше в МТ нетонких однорідних і шаруватих фізично лінійних і нелінійних пластин розроблено новий метод інтегрування неоднорідних СДРР високих порядків і з його використанням отримані загальні розв'язки цих систем;

6) розроблені нові наближені аналітичні методи розв'язання СДРР високих порядків МТ нетонких пластин і пологих оболонок;

7) уперше розроблені наближені методи зведення систем ДРР пологих оболонок довільної товщини до рекурентної послідовності СДРР, які ґрунтуються на використанні методу збурень і методу послідовних наближень (МПН);

8) на основі побудованих варіантів МТ нетонких пластин та пологих оболонок знайдені аналітичні розв'язки граничних задач в одинарних та подвійних тригонометричних рядах для довільних поперечних навантажень, зокрема локальних і зосереджених;

9) уперше в МТ товстих трансропних пластин отримані: загальні розв'язки систем ДРР високих порядків при вісесиметричних переривчастих і зосереджених навантаженнях (по колу, кільцю, кругу, в центрі); аналітичні розв'язки граничних задач для півнескінчених, круглих і кільцевих пластин при різних граничних умовах на бічній поверхні і різних поперечних навантаженнях; фундаментальні розв'язки ДР у високих наближеннях;

10) розроблено алгоритми і створено програми на мові ФОРТРАН для розв'язання в новій постановці лінійних і нелінійних граничних задач для нетонких однорідних та шаруватих пластин і пологих оболонок; досліджено НДС і крайові ефекти (КЕ) указаних елементів в залежності від механіко-геометричних параметрів (МГП), типу навантаження та наближення варіанта МТ.

Теоретичне і практичне значення отриманих результатів.

Теоретичне значення дисертаційної роботи Зеленського А.Г. полягає в побудові нових високоточних варіантів МТ нетонких однорідних і шаруватих фізично лінійних та нелінійних пластин і пологих оболонок, розробці на їх основі нових аналітичних методів розв'язання граничних задач даного класу, які дають можливість дослідити НДС та КЕ з високою точністю.

Практичне значення розроблених в роботі математичних теорій і методів, складених алгоритмів і програм, а також отриманих числових результатів розв'язання лінійних і нелінійних задач деформування нетонких однорідних і шаруватих пластин та пологих оболонок полягає в можливості їх використання в практиці науково-дослідних організацій і конструкторських бюро при розрахунках і проектуванні надійних та довговічних споруд і конструкцій з високою міцністю і жорсткістю.

Отримані в роботі високоточні розв'язки граничних задач можуть бути еталонними (тестовими) для наближених і чисельних методів.

Теоретичні та практичні результати, які викладені в дисертації, вже знайшли застосування в роботі ООО “Укррезервуарсервіс”, а також у навчальному процесі на будівельному факультеті ДВНЗ “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури” при викладанні дисципліни «Основи теорії пружності та пластичності» (є відповідні акти впровадження у додатку Ж).

Повнота викладу наукових положень, висновків, результатів і рекомендацій в опублікованих роботах.

За темою дисертації опубліковано 64 наукові статті (52 статті в одноосібному авторстві) і 36 тез наукових доповідей (33 тези в одноосібному авторстві): 6 статей у зарубіжних англomовних виданнях (4 статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних, з яких 1 стаття індексується в базі даних Scopus); 51 стаття у фахових виданнях України з фізико-математичних і технічних наук (29 статей у фахових виданнях України з фізико-математичних наук, з яких 1 стаття у виданні, що входить до міжнародних наукометричних баз даних); 7 статей у наукових виданнях України, з яких 2 статті входять до міжнародних наукометричних баз даних.

Опубліковані наукові праці в повній мірі відображають основні положення та результати дисертаційної роботи. Зазначені наукові роботи були опубліковані після захисту кандидатської дисертації автора, а докторська дисертаційна робота не містить матеріалів, викладених у кандидатській дисертації здобувача.

Апробація результатів дисертації. Результати наукових досліджень, що наведені в дисертації, доповідалися та обговорювалися на 55-х міжнародних і 2-х Всеукраїнських наукових конференціях. Також робота доповідалася і здобула позитивну оцінку на 8-ми наукових семінарах у провідних вищих навчальних закладах України і установах НАН України.

Оцінка змісту дисертаційної роботи.

Дисертація складається з анотації, вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 503 сторінки, з них – 305 сторінок основного тексту. Вона містить 47 рисунків, 70 таблиць, список використаних джерел із 453 найменувань на 38 сторінках та 8 додатків на 117 сторінках.

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, визначені проблема для вирішення і мета, сформульовані об’єкт і предмет дослідження, обрані методи досліджень, відзначено новизну одержаних результатів, їх обґрунтованість, достовірність та наукове і практичне значення, зазначено зв’язок з науковими програмами, планами і темами, наведено відомості про публікації та апробацію за темою дисертації і особистий внесок здобувача.

У **першому** розділі наведено огляд наукових досліджень, виконаних віт-

чизняними та зарубіжними авторами в області теорії і методів розрахунку пластин та оболонок.

У **другому** розділі обґрунтовується вибір аналітичного напрямку досліджень, сформульована методологія побудови варіантів МТ нетонких однорідних і шаруватих лінійно та нелінійно пружних пластин і пологих оболонок при довільних поперечних статичних навантаженнях; наведені розроблені нові аналітичні методи розв'язання неоднорідних СДРР високих порядків для вказаних елементів, які дають можливість звести їх до однорідних і неоднорідних ДР 2-го порядку.

У **третьому** розділі побудовано новий варіант МТ однорідних трансропних пластин довільної товщини з позицій тривимірної ТП. Варіант ґрунтується на методі розкладання усіх компонент НДС і граничних умов на бічній поверхні (як функцій трьох змінних) в ряди за поліномами Лежандра по поперечній координаті з використанням варіаційного принципу Рейснера (ВПР) і методики взаємозв'язаних рівнянь (МВР). Виведені ДРР, розв'язувальні та визначальні ДР. Побудовані загальні розв'язки. Розроблені методи розв'язання граничних задач, отримані числові залежності НДС від МГП, типу навантаження і наближень варіанта МТ. Доведені теореми про єдиність розв'язку другої граничної задачі і збіжність рядів для напружень за поліномами Лежандра.

У **четвертому** розділі розроблені нові варіанти МТ нетонких однорідних ортотропних і ізотропних фізично нелінійних по Каудереру пластин довільної сталої товщини. Варіанти МТ базуються на використанні ВПР, методу розкладання усіх компонент НДС і граничних умов у ряди за поперечною координатою при допомозі поліномів Лежандра, методу збурень лінійно пружних та ізотропних властивостей матеріалу (розкладання в степеневі ряди за малим фізичним параметром) і МВР. Побудовані загальні розв'язки рекурентної СДР, яка зведена до неоднорідних ДР 2-го порядку, праві частини яких залежать від НДС попередніх наближень за малим параметром. Проведено тестування методу збурень ізотропних властивостей матеріалу в задачах для трансропних пластин, яке підтвердило його ефективність. Побудовані аналітичні розв'язки фізично нелінійних граничних задач в одинарних та подвійних тригонометричних рядах. Чисельно досліджено НДС при циліндричному згині нетонких ФНП під дією гармонічного навантаження в широких межах змінення МГП.

П'ятий розділ присвячено побудові нового варіанту МТ однорідних трансропних пологих оболонок довільної товщини, що знаходяться під дією довільного поперечного навантаження. Уперше виведені в явному вигляді взаємозв'язані основні рівняння за різними наближеннями, включаючи високі, які придатні для розв'язання прикладних граничних задач даного класу. В одержаних СДР враховані кривини у деформаціях поперечного зсуву. Отримані форми і

загальні розв'язки СДР високого порядку. Розроблені алгоритм і пакет прикладних програм визначення НДС у різних наближеннях, побудовані аналітичні розв'язки в одинарних і подвійних тригонометричних рядах для різних видів навантаження (плавних і швидкозмінюваних по області, локальних, зосереджених). Отримані числові залежності компонент НДС прямокутних у плані пологих оболонок при моногармонічних, полігармонічних і локальних навантаженнях від МГП та наближень варіанта МТ.

У шостому розділі уперше побудовано новий варіант МТ нетонких однорідних ортотропних і ізотропних фізично нелінійних по Каудереру пологих оболонок та розроблені на його основі методи розв'язування граничних задач для оболонок даного типу. Варіант МТ, як і для пластин, оснований на ВПР, методі розкладання усіх компонент НДС і граничних умов на бічній поверхні у ряди за поперечною координатою при допомозі поліномів Лежандра в поєднанні з методом збурень пружних властивостей матеріалу і використанням МВР. Тривимірна задача ТП в МТ нетонких ФНО (ортотропних оболонок) зведена до нескінченної рекурентної послідовності лінійних двовимірних крайових задач для ізотропних оболонок (оболонок з осередненими ізотропними властивостями). Операторним методом побудовані загальні розв'язки СДР. Аналітично розв'язана гранична задача для ізотропної ФНО в одинарних тригонометричних рядах. Чисельно досліджено НДС пологих трансропних оболонок і нетонких ФНО при гармонічному навантаженні.

Сьомий розділ присвячено побудові нового варіанта МТ шаруватих (однорідних в межах кожного шару) трансропних і ізотропних фізично нелінійних пластин і пологих оболонок симетричної та несиметричної структур і розробці методів розв'язання граничних задач на його основі. Варіант МТ оснований на ВПР, методі розкладання усіх компонент НДС і граничних умов на бічній поверхні у ряди за поперечною координатою в межах кожного шару при допомозі комбінацій поліномів Лежандра, МВР в поєднанні з МПН для фізично нелінійних елементів. Знайдено точний аналітичний розв'язок тривимірної задачі ТП для шаруватих трансропних пластин при їх поперечному навантаженні і крайових умовах Нав'є. Отримані числові залежності НДС тришарових і двошарових трансропних пластин при гармонічному навантаженні від МГП та проведено їх порівняння з точними та відомими в літературі даними.

У восьмому розділі розроблено нові спрощуючі методи розв'язання граничних задач для нетонких трансропних пластин і пологих оболонок на основі нового побудованого варіанта МТ; розв'язано граничні задачі для товстих кругових пластин при різних навантаженнях і граничних умовах; запропоновано новий метод інтегрування СДР високих порядків для нетонких пластин при переривчастих і зосереджених навантаженнях; побудовано фундаментальні

розв'язки; доведено теорему про збіжність рядів для переміщень в методі збурень ГП.

У **висновках** наведено підсумки досліджень і вказано основні результати.

У **додатках** містяться формули, коефіцієнти, оператори, диференціальні рівняння, таблиці, графіки, перелік публікацій за темою дисертації, акти і довідка про впровадження результатів.

Структура і об'єм роботи відповідають вимогам до докторських дисертацій. Тексти дисертації та автореферату викладені на високому науковому рівні. Загальні висновки дисертаційної роботи мають чіткий характер і повністю відповідають її меті. Автореферат дисертації повністю відповідає змісту роботи і її основним положенням.

В цілому дисертаційна робота Зеленського А.Г. є завершеним науковим дослідженням, в якому розв'язано важливу наукову проблему, що полягає в побудові нових варіантів МТ нетонких фізично лінійних і нелінійних пластин та пологих оболонок при статичному навантаженні, розробці ефективних аналітичних методів розв'язання систем диференціальних рівнянь високих порядків і дослідженні НДС даних елементів.

Тема, зміст та результати дисертації відповідають паспорту спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла (фізико-математичні науки).

Дискусійні положення дисертаційної роботи та зауваження.

За змістом роботи можна зробити такі зауваження:

1. В дисертаційній роботі наведено порівняння розв'язків лінійно-пружних задач для нетонких пластин на основі розроблених варіантів МТ з точними розв'язками тривимірних задач ГП для пластин. Бажано було б порівняти результати розв'язання граничних задач для нетонких пологих оболонок з чисельними результатами, отриманими, наприклад, за допомогою методу скінченних елементів.

2. Також в роботі відсутнє порівняння отриманих результатів розрахунків з експериментальними даними.

3. У сьомому розділі в наближенні НК0-3 побудовані варіанти МТ нетонких шаруватих пластин і пологих оболонок при довільній кількості шарів. Було б доречно розглянути аналогічні задачі в більш високому наближенні, наприклад, НК0-5.

4. Бажано було б пояснити врахування лише перших двох наближень за малим параметром при розв'язанні методом збурень конкретних фізично нелінійних задач.

5. У текстах дисертації та автореферату зустрічаються описки та русизми.

Зазначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи і не зменшують ступеня обґрунтованості та вірогідності отриманих результатів.

Загальний висновок.

На підставі аналізу автореферату, дисертаційної роботи, авторських публікацій за темою роботи можна зробити висновок, що дисертаційна робота Зеленського Анатолія Григоровича на тему «Варіант математичної теорії нетонких пружних пластин і пологих оболонок при статичному навантаженні» є завершеною науковою працею, яка виконана на високому рівні. За актуальністю теми, обсягом виконаних досліджень, новизною, теоретичною та практичною цінністю результатів робота відповідає вимогам щодо докторських дисертацій, зокрема «Порядку про присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами), а її автор, Зеленський Анатолій Григорович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент:

провідний науковий співробітник

відділу динаміки та стійкості суцільних середовищ

Інституту механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України

доктор фізико-математичних наук, професор

Є.А.Сторожук

Підпис Є.А. Сторожука засвідчую:

вчений секретар Інституту механіки

ім. С.П.Тимошенка НАН України

доктор фізико-математичних наук



О.П. Жук