

Вченому секретарю  
спеціалізованої вченої ради  
К 55.051.03 доц. Савченко Є.М.

---

Сумський державний університет  
40007, м.Суми, вул.Римського-Корсакова, 2

**ВІДГУК**  
**офіційного опонента на дисертаційну роботу**

Дейнеки Андрія Віталійовича  
“Конструкційна міцність багат шарових елементів машин з дефектами  
структури”, що подана на здобуття  
наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю  
05.02.09 – динаміка і міцність машин

На розгляд представлено рукопис кандидатської дисертації, автореферат, копії опублікованих робіт та висновок Сумського державного університету (СумДУ), де виконувалася робота.

Основні положення дисертації відображені в 6 статтях у фахових наукових виданнях України, 1 статті в зарубіжному виданні.

Дисертаційна робота Дейнеки Андрія Віталійовича виконана на кафедрі загальної механіки та динаміки машин Сумського державного університету, науковий керівник д.т.н., проф. Верещака С.М.

Робота виконувалася у відповідності до затвердженої програми наукової діяльності СумДУ в рамках науково-дослідницьких робіт: «Несуча здатність комбінованого газового балона високого тиску» (0110U004017), «Дослідження робочого процесу та розробка теорії нових енергоефективних та ресурсозберігаючих конструкцій ущільнень відцентрових машин» (0113U000135).

**1. ЗАГАЛЬНА СТРУКТУРА РОБОТИ**

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, додатка і списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації (у тому числі і додаток) складає 168 сторінок. Список використаної літератури включає 149 найменувань вітчизняних і закордонних джерел.

Оформлення і стиль викладення в дисертаційній роботі та авторефераті відповідають встановленим вимогам.

**2. ОЦІНКА АКТУАЛЬНОСТІ ТЕМИ ДИСЕРТАЦІЇ**

Тема дисертаційної роботи “Конструкційна міцність багат шарових елементів машин з дефектами структури” безперечно актуальна, тому що присвячена дослідженню методик з розрахунків на міцність і знаходженню

напружено-деформованого стану багат шарових конструкцій з дефектами структури на основі уточненої дискретно-структурної теорії, коли враховуються адекватні кінематичні та статичні умови контактної взаємодії суміжних поверхонь сполучених шарів під час дії як статичного, так і температурного навантаження. Розроблені алгоритми, програми, методики досліджень і отримані на їх основі теоретично-експериментальні результати показали наявність нових особливостей під час розв'язання розглянутих задач. Отримані нові числові розв'язки термопружного стану багат шарових оболонок обертання, коли на одній частині міжфазної поверхні контакту суміжних шарів виконуються умови ідеального контакту, а на іншій спостерігаються ділянки з неідеальним контактом (непроклеї, розшарування, проковзування). Розроблено на основі класичної теорії пружності анізотропного тіла чисельно-аналітичний підхід розв'язання термопружних незв'язаних крайових задач для циліндричних товстостінних оболонок за умови як ідеального, так і неідеального контакту суміжних шарів по сполученим поверхням, встановлено вплив температурного навантаження на напружено-деформований стан композитних балонів, труб та ущільнень робочих коліс. Установлений вплив жорсткості фланців на напружено-деформований стан склопластикових труб у зоні їх з'єднань.

Одержані в роботі наукові результати дозволяють під час проектування конструкцій зі склопластику значно поліпшити техніко-економічні показники таких конструкцій, а також удосконалити технологію їх виробництва.

### 3. ОЦІНКА НАУКОВОЇ НОВИЗНИ

Наукова новизна виконаної дисертації, на наш погляд, перш за все полягає в тому, що автором роботи проведений детальний аналіз узагальнених рівнянь дискретно-структурної теорії багат шарових оболонок із дефектами структури матеріалу по товщині, які отримані на основі варіаційного принципу Рейснера. Побудовано замкнену систему диференціальних рівнянь та відповідні крайові умови незв'язаної стаціонарної задачі термопружного деформування композитної оболонки шаруватої структури, що дозволяють врахувати деформації поперечного зсуву і трансверсального обтиснення, забезпечити умови механічного і теплового сполучення шарів і умови термомеханічного навантаження на лицьових поверхнях такої оболонки

В роботі на основі класичної теорії пружності анізотропного тіла та метода сплайн-колокації вперше отримано чисельно-аналітичні розв'язки термопружної крайової задачі деформації циліндричних оболонок обертання шаруватої структури від дії внутрішнього тиску і температурного навантаження з неідеальним міжшаровим контактом, виявлені основні закономірності зміни напруженого стану при врахуванні проковзування суміжних шарів по сполученим поверхням, визначено інтегральні коефіцієнти теплового лінійного розширення багат шарового анізотропного матеріалу;

Виконана дисертаційна робота представляє собою подальший розвиток наукових основ дискретно-структурної теорії та застосування поліноміальних критеріїв міцності.

Робота Дейнеки Андрія Віталійовича має всі необхідні ознаки наукової новизни кандидатської дисертації. У цій частині дисертація цілком відповідає встановленим вимогам.

#### 4. ОЦІНКА ДОСТОВІРНОСТІ ТА ОБҐРУНТОВАНOSTІ ОСНОВНИХ ПОЛОЖЕНЬ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Достовірність отриманих результатів забезпечена використанням апробованих методів розв'язання крайових задач, фізично обґрунтованих моделей конструкцій і матеріалів, доброю кореляцією теоретичних результатів як з отриманими в роботі, так і наведеними в літературних джерелах експериментальними і теоретичними даними.

Теоретичні і експериментальні дослідження виконані на високому науковому рівні.

Усе вище викладене дозволяє вважати всі основні положення дисертації обґрунтованими, а отримані результати - достовірними.

#### 5. ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ РОБОТИ

У роботі, що рецензується, автором на основі теоретичних і експериментальних досліджень розроблено методику з розрахунків на міцність і граничний стан багат шарових конструкцій з дефектами структури на основі уточненої дискретно-структурної теорії, коли враховуються реальні умови взаємодії шарів і величина зміни контактних напружень на міжшарових границях. Отримані на її основі результати дозволяють забезпечити більш інтенсивне впровадження нових композиційних матеріалів в різні галузі сучасної техніки, також під час проектування конструкцій із склопластику значно поліпшити техніко-економічні показники таких конструкцій і удосконалити технологію їх виробництва.

Теоретичні і числові результати досліджень використовувалися під час розробки нових конструкцій і виробів з композиційних матеріалів для хімічного машинобудування. Проведено оцінку конструкційної міцності склопластикових труб, встановлений вплив жорсткості фланців на напружено-деформований стан склопластикових труб у зоні їх з'єднань.

Результати дисертаційної роботи впроваджені на підприємстві ТОВ «СКЛОПЛАСТИКОВІ ТРУБИ» (м. Харків) і в навчальний процес Сумського державного університету для студентів напрямку підготовки «Механіка» та магістрів спеціальності «Комп'ютерна механіка».

Практична цінність представлених для використання методик, рекомендацій і алгоритмів забезпечує здобуття обґрунтованих відомостей про роботу комбінованих оболонкових конструкцій з урахуванням часткового руйнування, що є особливо актуальним для підприємств машинобудування.

## 6. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

У *вступі* автор обґрунтовує актуальність обраної теми, ставить мету і завдання дослідження, а також приводить дані по апробації роботи, її зв'язку з науковою тематикою, структурі та публікаціях.

У *першому розділі* розглянуто достатньо велику кількість робіт стосовно теорії тонкостінних конструкцій з композиційних матеріалів, включно фундаментальні і оглядові, у тому числі іноземних авторів. Особлива увага приділена варіантам уточненої неklasичної теорії С.П. Тимошенка. Проаналізовані феноменологічний і дискретно-структурний підходи. Детально розглянута задача термопружності багатошарових армованих елементів конструкцій. У підрозділі чисельного моделювання розглядалися методи скінченних і граничних елементів та приведення задачі аналітичними способами до системи диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами і їх застосування для розв'язання крайових задач. Розглянуті критерії міцності різного походження.

В цілому аналіз літературних джерел є дуже переконливим.

*Другий розділ* присвячено узагальненню рівнянь дискретно-структурної теорії багатошарових оболонок і пластин із дефектами структури матеріалу по товщині. За допомогою отриманих рівнянь рівноваги, геометричних і фізичних співвідношень враховуються геометрична нелінійність деформацій, деформації поперечного зсуву і трансверсального обтиснення.

Для розв'язання контактної крайової задачі у змішаній формі складена система диференціальних рівнянь дискретно-структурної теорії багатошарових оболонок. Статичні умови контакту по лицьових сполучених поверхнях сусідніх шарів виконуються за допомогою методу штрафних функцій. Для оболонок обертання, які містять  $n$  шарів зі співвісними поверхнями, отримана система з  $n \times 14$  диференціальних рівнянь у частинних похідних. Згідно з наведеним варіантом дискретно-структурної теорії розроблено дві розрахункові моделі, які містять неідеальні ділянки контакту сполучених поверхонь анізотропних шарів.

У випадку, коли між шарами оболонки кінематичні зв'язки відсутні, по поверхні сполучення цих шарів  $S_z^{(k,k+1)}$  можуть виникати невідомі вектори зусиль  $\bar{q}_{(k)}$ ,  $\bar{q}_{(k+1)}$  контактної взаємодії. Для врахування впливу зусиль контактної взаємодії шарів у варіаційне рівняння принципу Рейснера додатково введений доданок, за допомогою якого враховується робота сил контактної взаємодії. Величина зони контакту визначається методом простих ітерацій.

Для розв'язання задачі термопружності складені рівняння теплопровідності для багатошарової оболонки, яка складається з  $n$ -анізотропних криволінійних шарів з різними теплофізичними властивостями. Наведена задача теплопровідності вирішується без урахування впливу деформування конструкції на зміну поля температур і відноситься до класу незв'язаних задач теорії термопружності.

За допомогою узагальненого варіаційного принципу Рейснера і дискретно-структурної теорії багатошарових оболонок отримані рівняння термопружності в змішаній формі. Коли температурне поле не залежить від часу, запропоновано алгоритм розв'язку стаціонарної незв'язаної задачі теорії термопружності

багат шарових оболонки.

*У третьому розділі* на основі класичної теорії пружності анізотропного тіла досліджується напружено-деформований стан багат шарового порожнистого циліндру кінцевої довжини під дією внутрішнього тиску і температурного навантаження. При розрахунку враховуються наближені до реальних умови взаємодії шарів і величина зміни контактних напружень на міжшарових границях. Задача розглядається в осесиметричній постановці.

Запропонована методика визначення зведених термопружних характеристик розглянутого пакета шарів у цілому. Порівняння отриманих результатів та аналогічних даних, наведених у відомих публікаціях, підтверджує коректність запропонованої методики визначення інтегральних технічних параметрів багат шарового композита.

Проведені на основі класичної теорії пружності анізотропного тіла і дискретно-структурної теорії дослідження напружено-деформованого стану плоского криволінійного бруса, дозволяють побачити, що найбільш адекватно реальну картину напружено-деформованого стану відображає дискретно-структурна теорія з урахуванням неідеального контакту шарів, коли допускається пружне проковзування спряжених поверхонь сусідніх шарів один відносно одного.

Запропоновано два алгоритми дослідження напружено-деформованого стану багат шарового товстостінного циліндру кінцевої довжини під дією внутрішнього тиску і температурного навантаження. Рішення крайової задачі за допомогою методу сплайн-колокації дозволяє розглядати різні варіанти закріплення кінців циліндру, а також проводити дослідження напружено деформованого стану циліндру, коли враховується реальні умови взаємодії шарів і величина зміни контактних напружень на міжшарових границях.

*У четвертому розділі* розроблена експериментально-теоретична методика для визначення фізико-механічних характеристик склопластикових труб, проведена експериментальна перевірка достовірності теоретичних результатів й оцінки похибок, що вносять різного роду припущення в розрахунки на міцність тонкостінних елементів із міжшаровими дефектами. На основі методів математичної статистики визначені довірчі інтервали експериментально отриманих середніх значень модуля пружності й граничних напружень склопластику при розтяганні та стисканні.

Створена експериментальна установка для проведення випробувань криволінійних брусів зі склопластику на згинання внаслідок дії протилежно спрямованих зосереджених поперечних сил  $P$ , прикладених до його торців.

Для оцінки достовірності результатів, отриманих на основі запропонованої експериментально-теоретичної методики, додатково були проведені гідростатичні випробування склопластикових труб. При цьому досліджувалися несуча здатність експериментальних зразків та вплив жорсткості сталевих фланців на напружено-деформований стан склопластикових труб у зоні їх з'єднань.

Для оцінки адекватності чисельно-аналітичного методу розв'язання термопружної задачі, описаного в попередньому розділі, були проведені випробування сталюї труби зміцненої склопластиковим бандажем при дії

внутрішнього тиску.

У п'ятому розділі наведені нові результати розв'язання крайових задач дискретно-структурної теорії шаруватих оболонок обертання із міжшаровими дефектами структури, подана методика та проведені розрахунки на міцність і несучу здатність склопластикових труб та торових балонів.

Для обчислення геометричних параметрів оболонок обертання складної форми запропонований алгоритм апроксимації меридіана такої поверхні у вигляді B-сплайнів як параметричних функцій  $(z(t), y(t))$  на рівномірній сітці. Показано схему лінеаризації розв'язувальних нелінійних диференціальних рівнянь на основі ітераційного методу Ньютона-Канторовича.

Розв'язок крайової задачі отриманий за допомогою методу ортогональної прогонки, запропонованого С. К. Годуновим. Він розроблений як метод розв'язання двоточкових крайових задач для систем лінійних звичайних диференціальних рівнянь. На основі цього методу проблема сингулярності матриці системи алгебраїчних рівнянь, що виникає при пошуку довільних сталих, вирішується шляхом ортогоналізації компонент розв'язку на дискретному наборі точок інтервалу розв'язку.

Установлений вплив жорсткості фланців на напружено-деформований стан склопластикових труб у зоні їх з'єднань. Для визначення теоретичного значення граничного тиску, при якому відбувається руйнування склопластикової труби в точках поверхні її контакту з металевими фланцями, використовувався модифікований поліноміальний критерій міцності. Модифікований поліноміальний критерій міцності для тонкостінних елементів із шаруватих композитів із міжшаровими дефектами структури матеріалу містить граничні характеристики шару на поперечний зсув і трансверсальне стискання (розтягання). Відмічено, що варіюючи жорсткість фланців, можна досягти оптимальних умов роботи розглянутої конструкції склопластикової труби.

Вивчена несуча здатність торових балонів із композиційних матеріалів, що виготовляються методом намотування. Задача розв'язується на основі першої моделі дискретно-структурної теорії та прикладного методу розрахунків несучої здатності шаруватих тонкостінних елементів.

## 7. ЗАУВАЖЕННЯ ПО ДИСЕРТАЦІЇ Й АВТОРЕФЕРАТУ

1. Другий розділ роботи перенавантажений складними співвідношеннями, які можливо було привести у додатку.

2. В третьому розділі дуже стисло описане температурне навантаження, яке діє на ущільнююче кільце в результаті роботи насоса в не розрахунковому режимі.

3. В четвертому розділі дуже стисло наведене описання методики визначення модуля пружності та граничних характеристик кільцевих зразків методом розрізного диска, що не дає можливості визначити її новизну.

4. У п'ятому розділі отримані значення дотичних і трансверсальних напружень, які виникають у точках контакту сталевих і дюралюмінієвих фланців

зі склопластиковою оболонкою. Виникає питання: чому не був розглянутий варіант фланця зі склопластику або із іншого композиційного матеріалу?

## 8. ЗАКЛЮЧНА ОЦІНКА ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Дисертація Дейнеки Андрія Віталійовича “Конструкційна міцність багатошарових елементів машин з дефектами структури” є закінченою науково-дослідною роботою, що містить наукові положення, які можна розглядати як вирішення важливого прикладного завдання. Реалізація результатів роботи буде сприяти подальшому розвитку машинобудівної галузі України. Робота виконана на високому рівні, містить нові, цінні з наукової і практичної точки зору результати, написана технічно грамотною мовою. Результати роботи підтверджені актами про впровадження її результатів у виробництво, науково-дослідний та освітянський процес.

Дисертація відповідає вимогам п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р., які висуваються до кандидатських дисертацій та паспорту спеціальності 05.02.09 – динаміка та міцність машин, а її автор Дейнека Андрій Віталійович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук із зазначеної спеціальності.

Завідувач кафедри динаміки і міцності машин  
Національного технічного університету  
«Харківський політехнічний інститут»,  
доктор технічних наук, професор

Г.І. Львов

Підпис *Григорій Львов Г.І.*  
ЗАСВІДЧУЮ  
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР *Ю.І. Заїцев*  
ЗАЙЦЕВ Ю.І.

