

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Гребенюка С.М.
«Напружено-деформований стан просторових конструкцій на основі
гомогенізації волокнистих композитів» на здобуття
наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю
01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

1. Актуальність теми дисертації. Широке застосування композиційних матеріалів при створенні нової техніки обумовлює необхідність розвитку нових підходів і методів при визначенні напружено-деформованого стану конструкцій.

При проектуванні конструкцій із волокнистих композитів виникає необхідність у врахуванні різномірних елементів (матриці та волокон) у математичній моделі композита. Врахування кожного волокна у математичній моделі робить її громіздкою і не придатною до практичних розрахунків, тому широкого розповсюдження набувають методи гомогенізації волокнистих композитів, в результаті застосування яких можна отримати ефективні механічні характеристики композита. Чим точніше будуть враховуватися вихідні властивості матриці та волокна при гомогенізації, тим точніше будуть описувати механічну поведінку композита ефективні пружні сталі.

Використання волокнистих композитів при створенні складних просторових конструкцій приводить до необхідності вдосконалення чисельних методів визначення напружено-деформованого стану таких конструкцій.

Отже, тема дисертаційної роботи Гребенюка С.М., присвяченої розробці нових моделей ефективних пружних сталих та створенню ефективних чисельних підходів при визначенні напружено-деформованого стану просторових конструкцій із композиційних матеріалів, є актуальною.

2. Загальна характеристика дисертаційної роботи. Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, наведено загальну характеристику роботи, сформульовано мету й основні завдання досліджень. Викладено наукову новизну, практичне значення результатів досліджень, наведено відомості про особистий внесок здобувача та про апробацію результатів дисертаційної роботи.

У *першому розділі* Гребенюк С.М. аналізує наявні співвідношення для ефективних пружних сталих композита та методи гомогенізації волокнистих композитів. Особливу увагу приділено врахуванню специфічних властивостей складових, таких як в'язкопружність, анізотропія та інших, при визначенні

ефективних механічних характеристик композита. Розглянуто основні методи розв'язання задач механіки деформівного твердого тіла для композиційних та анізотропних матеріалів. Об'єктом аналізу в розділі також є застосування чисельних методів, в тому числі методу скінченних елементів.

На основі проведеного аналізу сформульовано основні завдання, які необхідно вирішити в ході виконання дисертаційної роботи.

Другий розділ дисертант присвячує отриманню аналітичних співвідношень для п'яти ефективних пружних характеристик трансропного однорідного матеріалу, що моделює композит. Складові композита приймалися трансропними. Співвідношення для кожної характеристики отримано із розв'язання двох крайових задач: задачі для сумісного деформування матриці і волокна та задачі для однорідного трансропного матеріалу, що моделює композит. Як умова узгодження для обох задач, використовувалась рівність компонентів вектору переміщень. Поздовжні характеристики добре збігаються з експериментальними даними, отриманими іншими авторами. Для поперечних характеристик отримано по два аналітичних вирази. Питання, котрий із них використовувати при розрахунках, вирішується у наступному розділі.

У *третьому розділі* з використанням розв'язків крайових задач, отриманих у попередньому розділі, на основі енергетичної умови уточнено поперечні ефективні сталі композита. Порівняння з експериментальними даними для гумовокордного матеріалу та для волокнистого композита на основі епоксидної смоли показують, що співвідношення, отримані з використанням енергетичної умови, точніші, ніж співвідношення, отримані на основі кінематичної умови. Також на основі запропонованих аналітичних співвідношень розроблено підхід до визначення пружних ефективних характеристик композита із трансропними складовими, армованого двома сортами періодичних волокон.

Четвертий розділ присвячений отриманню основних співвідношень матриці жорсткості для тривимірного паралелепіпедного скінченного елемента з урахуванням просторової орієнтації волокон у композиті. Для усунення недоліків традиційної схеми методу скінченних елементів застосовано моментну схему, яка полягає у подвійній апроксимації компонентів переміщень та деформацій. Досліджено збіжність результатів розрахунків за допомогою розробленої матриці жорсткості для конструкції із гумовокордного матеріалу.

У *п'ятому розділі* описані прийоми щодо практичної реалізації розроблених моделей і методів у вигляді пакету прикладних програм. Описано ітераційний підхід до врахування геометричної нелінійності при деформуванні. Надано характеристику пакету прикладних програм та прийомам візуалізації великих масивів чисельної інформації, які отримуються в результаті використання методу скінченних елементів.

Шостий розділ присвячено розрахункам конструкцій із гумовокордних матеріалів. Досліджено напружено-деформований стан віброізолятора у двох варіантах конструктивних рішень: із суцільною та внутрішньою композитними вставками. Встановлено вплив геометричної нелінійності та схем укладки волокон на величину осадки віброізолятора. Також визначено напружено-деформований стан вантажної автомобільної шини. Матеріал корду приймався транслопомним. Отримано конфігурацію профілю шини під дією внутрішнього тиску.

У сьомому розділі досліджено напружено-деформований стан головного обтічника ракетносія при двох режимах роботи. Конструкція являє собою багатошарову оболонку із епоксидної матриці та вуглецевих волокон. Експлуатаційне навантаження моделювалось комбінацією радіального поверхневого навантаження та осьових сил. Визначено зони максимальних значень інтенсивності напружень, які є найбільш небезпечними з точки зору міцності.

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій. Вивчення матеріалів дисертаційної роботи, автореферату та публікацій дає можливість стверджувати, що обґрунтованість основних одержаних результатів забезпечується строгістю і коректністю постановки та розв'язання розглянутих у роботі завдань.

Адекватність отриманих ефективних характеристик та чисельних розрахунків підтверджена порівнянням із даними, отриманими із застосуванням теоретичних та експериментального методів. Отримані результати не суперечать механічному смислу задачі.

Обґрунтованість наукових положень, висновків, запропонованих рішень і рекомендацій підтверджується результатами апробації роботи на наукових семінарах, науково-технічних конференціях та симпозіумах.

4. Достовірність і новизна наукових положень, висновків та рекомендацій. Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій дисертаційної роботи забезпечується:

– коректним застосуванням аналітичних та чисельних методів розв'язання задач;

– збіжністю значень обчислених ефективних характеристик з експериментальними даними та результатами аналітичних розрахунків за співвідношеннями, отриманими іншими авторами;

– узгодженням чисельних результатів, отриманих за допомогою запропонованих чисельних підходів, із аналітичними розв'язками задачі механіки деформівного твердого тіла;

– апробацією положень дисертаційної роботи на наукових конференціях і семінарах різних рівнів.

Сформульовані в дисертації наукові положення, висновки й рекомендації впливають безпосередньо з теоретичних та чисельних результатів проведених досліджень.

Новизна наукових положень, висновків та рекомендацій полягає в наступному:

- отримані нові аналітичні співвідношення для ефективних пружних характеристик волокнистого композиційного матеріалу з урахуванням транслопних властивостей матриці та волокна;

- запропоновано підхід до визначення ефективних характеристик односпрямованого волокнистого композиційного матеріалу, армованого двома сортами волокон, що мають транслопні властивості;

- вперше побудовано матрицю жорсткості тривимірного скінченного елемента композиційного матеріалу з урахуванням просторового армування волокнами на основі моментної схеми скінченного елемента;

- отримали подальший розвиток чисельні підходи до врахування геометричної нелінійності волокнистого композиційного матеріалу із застосуванням моментної схеми скінченного елемента для дослідження напружено-деформованого стану конструкцій із волокнистих композитів;

- на основі моментної схеми скінченного елемента та запропонованих ефективних пружних сталих досліджено напружено-деформований стан конструкцій із гумовокордних матеріалів;

- із застосуванням моментної схеми скінченного елемента отримано напружено-деформований стан аерокосмічних конструкцій із волокнистих композитів в умовах експлуатаційного навантаження.

5. Значення дисертаційної роботи для науки і виробництва. Отримані співвідношення для ефективних пружних сталих волокнистого композита та запропоновані чисельні підходи реалізовані у вигляді програмного пакету, можуть бути застосовані при проектуванні композитних конструкцій на підприємствах різних галузей промисловості.

Розроблені в дисертації підходи до розв'язання задач механіки композитів були впроваджені у відділі механіки еластомерних конструкцій Інституту геотехнічної механіки НАН України при розрахунку та створенні гумових віброізоляторів із проміжним шаром із волокнистих композитів та в КБ «Південне» для визначення напружено-деформованого стану головного обтічника ракетносія. Також отримані результати досліджень використовуються в навчальному процесі в Запорізькому національному університеті.

6. Повнота викладу результатів роботи в наукових фахових виданнях. Основні результати дослідження викладено в 67 наукових працях, з них: 3 монографії; 53 статті, серед яких 30 входять до переліків, затверджених Департаментом атестації кадрів вищої кваліфікації Міністерства освіти і науки

України з технічних наук, 6 у журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз даних, або в зарубіжних наукових фахових виданнях, 6 у збірниках матеріалів конференцій та 11 додаткових публікацій; 10 тез доповідей та 1 авторське свідоцтво.

Робота пройшла широку апробацію, її основні положення доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях.

Основні положення докторської дисертації не збігаються з основними положеннями кандидатської.

Дисертація Гребенюка С.М. «Напружено-деформований стан просторових конструкцій на основі гомогенізації волокнистих композитів» є завершеною науковою працею. Її написано грамотною технічною українською мовою та оформлено відповідно до чинних вимог. Робота добре ілюстрована й не перевантажена зайвим матеріалом.

Зміст дисертаційної роботи цілком відповідає спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла, за якою вона подана до захисту, і профілю спеціалізованої вченої ради Д 17.052.01.

Автореферат дисертації відображає основний зміст, положення та висновки дисертаційної роботи.

7. Зауваження.

7.1. При визначенні ефективних пружних характеристик волокнистого композита досліджується елементарний об'єм, що містить одне волокно, тому не враховується вплив інших волокон на напружено-деформований стан досліджуваного об'єму і відповідно на ефективні пружні сталі композита.

7.2. Доцільно було б провести розрахунки конструкцій із застосуванням як запропонованих співвідношень для ефективних пружних сталей, так і співвідношень, отриманих іншими авторами, та провести їх порівняльний аналіз.

7.3. При побудові матриці жорсткості волокно вважалось прямолінійним. Доцільно було б урахувати зміну орієнтації волокна всередині скінченного елемента, особливо це актуально, коли при дискретизації отримуємо скінченні елементи зі значною різницею лінійних розмірів.

7.4. Не у всіх задачах вказано сітки дискретизації конструкцій на скінченні елементи.

Проте, зазначені вище зауваження не мають принципового характеру, не знижують наукового рівня дисертації та не впливають на позитивну оцінку роботи.

8. Загальний висновок. Дисертаційна робота є завершеною науково-дослідною працею, в якій отримані нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують наукову задачу визначення напружено-деформованого стану просторових конструкцій із волокнистих композиційних матеріалів на основі вдосконалених моделей пружних сталей та ефективних чисельних

підходів. За актуальністю, науковим рівнем розробок та їх практичним значенням, наявністю необхідної кількості та обсягу публікацій дисертаційна робота Гребенюка Сергія Миколайовича «Напружено-деформований стан просторових конструкцій на основі гомогенізації волокнистих композитів» повністю відповідає вимогам ДАК МОН України, а саме «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», а її автор заслуговує присвоєння наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент, завідувач відділом
термопружності Інституту механіки
імені С.П. Тимошенка НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор

В.Г. Карнаухов

Підпис В.Г. Карнаухова засвідчую.

Вчений секретар Інституту механіки
імені С.П. Тимошенка НАН України



 д.ф.-м. наук О.П.Жук