

ВІДГУК

офіційного опонента, завідувача кафедри фундаментальної математики Запорізького національного університету, доктора технічних наук, доцента Гребенюка Сергія Миколайовича на дисертацію Ткачука Миколи Миколайовича **«Мікромеханічні моделі та методи осереднення властивостей матеріалів мережевої структури та проміжних шарів контактуючих тіл»**, подану на здобуття ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Актуальність теми дисертації

На теперішній час розвиток науки та техніки, стикається з великою кількістю обмежень, що стають на заваді подальшого поліпшення споживчих, технічних та тактико-технічних характеристик виробів різного призначення, з іншого боку, пропонується усе більша кількість перспективних рішень, за допомогою яких ці обмеження можуть бути подолані. Зокрема, це стосується фізичних властивостей конструкційних матеріалів, які не задовольняють повною мірою потреби розробників і виробників. Також мова іде про способи їхньої обробки та виготовлення, за рахунок яких можна зберігати та підвищувати експлуатаційні показники деталей та виробів. За умов, коли багато технологічних прийомів та технологій досягли максимуму своєї спроможності та вичерпали можливості досягнення по-справжньому проривних технологій, наукова та технічна спільнота все більше уваги звертає на дослідження мікроструктури та пошук на цьому рівні нових механізмів, які би давали змогу досягати бажаних результатів.

Явища та закономірності, які проявляються у об'єктах зі складною внутрішньою будовою, виходять далеко за межі класичних теорій, зокрема, традиційної механіки деформівного твердого тіла. Основні гіпотези та припущення, на яких базуються ці теорії, походять із уяви про суцільне середовище, а фізичні процеси, як правило, описуються виключно у макроскопічному масштабі та характеризуються набором фізичних величин, пов'язаних відповідними законами. Дослідження цих явищ вимагає принципово нових підходів до створення теоретичних моделей та їхнього обґрунтування, які би спиралися на адекватну уяву про деформівне тіло із мікроструктурою, що складається з великої кількості елементів різної природи, та про фізичні процеси на мікрорівні, які визначають поведінку елементів внутрішньої будови, їхню взаємодію, та їхній зв'язок із механічними властивостями на макрорівні.

На сьогодні така постановка проблеми є новою та не досліджена достатньою мірою. Перспективи цього наукового напрямку зумовлені новими можливостями стосовно отримання нових знань щодо існуючих матеріалів та виробів, які мають безпосереднє застосування у інженерній практиці.

Отож, створення теоретичних основ і розвиток мікро-макромеханічних моделей для якомога ширшого кола об'єктів є актуальною і важливою науково-практичною проблемою.

Її вирішення становить мету дисертаційного дослідження Миколи Миколайовича Ткачука. В його роботі основну увагу приділено матеріалам із волоконною мікроструктурою, які отримують все ширше застосування для структурних і функціональних елементів конструкцій та при контактній взаємодії пружних тіл із урахуванням поверхневих і проміжних шарів, механічні властивості яких також визначаються технологічним впливом на мікроструктуру.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій

В дисертації здійснено всебічний аналіз стану проблеми побудови мікроструктурних моделей. Виявлені недоліки раніше запропонованих підходів, враховуючи які, були визначені мета і задачі наукового дослідження.

У дисертації була запропонована загальна постановка задач осереднення властивостей матеріалів із дискретною мікроструктурою та властивостей проміжних контактних шарів. В її основі лежать об'єктивні принципи механіки, які зберігають справедливість як на макро-, так і на мікрорівні. Базові припущення, які зроблені для побудови окремих моделей, піддано прискіпливому аналізу. Автором на декількох прикладах здійснено оцінку похибки, яку привносять спрощення у математичній моделі. У роботі задіяні методи і моделі із класичних розділів механіки та фізики: загальної термодинаміки суцільних тіл, статистичної механіки полімерів, контактної механіки шорстких тіл тощо. Математичні викладки відрізняються строгістю та представлені у чіткій та послідовній формі.

Достовірність отриманих результатів

Результати, отримані в роботі, підтверджується шляхом порівняння із відомими результатами, отриманими іншими дослідниками, та порівнянням із експериментальними даними наведеними в літературі, а також отриманими безпосередньо в роботі. Виявлена їх повна збіжність. Широта охоплення наведених прикладів та застосувань також свідчить про високу універсальність моделей та обчислювальних інструментів, створених у роботі. У дисертації наведені рекомендації стосовно реальних машинобудівних виробів, які були впроваджені у практику інженерних розробок на підприємствах України. Продемонстровано ефективність урахування мікроструктурних факторів для декількох важливих для промислової та оборонної галузі випадків.

Наукова новизна

До основних пунктів наукової новизни слід віднести розробку принципово нові підходи до осереднення мікроструктури та визначення макроскопічних властивостей і відгуку тіл шляхом урахування відгуку внутрішньої будови на зовнішній вплив, а також створенні на їхній основі

нових моделей деформування матеріалів із мережевою будовою та контактної взаємодії тіл із проміжним шаром між ними. У роботі розроблені чисельні підходи до розв'язання поставлених задач, які було реалізовано програмно у середовищах математичного моделювання та інженерних комплексах комп'ютерних розрахунків. Установлено принципово нові закономірності поведінки матеріалів та елементів конструкцій, які пов'язані з особливостями їхньої мікробудови, що раніше не знаходили пояснення у межах інших теорій та моделей.

У цілому можна погодитися із формулюваннями складових наукової новизни у редакції, яка наведена у дисертації.

Структура і зміст роботи.

Робота містить анотації, сім розділів, вступну частину, висновки, а також додатки.

У *вступній частині* обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та завдання досліджень, наведено основні напрямки та методи розв'язання задач, які виникають, а також викладено основні положення, що визначають наукову новизну, та доведено практичну значимість роботи.

У *першому розділі* здійснено аналіз стану досліджуваної проблеми, наведені відомі моделі матеріалів зі складною мікроструктурою, зокрема волоконною, а також проведено дослідження з контактної взаємодії, в тому числі різноманітні моделі шорсткості поверхонь. Не зважаючи на значний інтерес та отримані нові результати у цьому науковому напрямку автором виявлені істотні недоліки у існуючих моделях та методах, які обмежують їхнє застосування. Зокрема, відзначається обмеженість представницького подання випадкових мереж у статистичних теоріях осереднення, які не враховують важливих особливостей будови та не здатні відтворити реальні механізми деформування мікроструктур цих елементів. Тим самим втрачаються переваги мікромеханічного обґрунтування, адже такі моделі все одно вимагають феноменологічного уточнення задля отримання збіжності із реальною поведінкою матеріалів. Схожі проблеми виділено і у зв'язку з наведеними моделями шорсткості. Попри те, що багато з них спираються на глибоко опрацьовану теорію геометрії мікроконтактів і пропонують добре обґрунтовані оцінки її впливу на загальні механічні властивості поверхонь та проміжних шарів, все одно між різними теоріями існують істотні розбіжності, які досі не вдалося узгодити між собою. Крім того, існує складність перевірки основних припущень цих теорій та визначення параметрів моделей. На основі цього у роботі робиться висновок про необхідність узагальненої моделі контакту, в межах якої можна було би поєднати різні моделі. Відповідно до цього визначено два напрямки досліджень, до яких сформульовані спільні вимоги: адекватне мікромеханічне обґрунтування та об'єктивні варіаційні принципи побудови розв'язувальних співвідношень.

У *другому розділі* викладено загальний підхід до розв'язання задач мікромеханіки, згідно якому необхідними складовими є, по-перше,

мікромеханічне подання, яке визначає внутрішню будову матеріалу чи проміжного шару, кінематичні умови зв'язку, що поєднують деформації на мікро- та макрорівнях, а також рівняння балансу, які визначають рівноважний відгук мікроструктури та суцільного тіла. У загальному вигляді запропоновані принцип мінімуму осередненої внутрішньої енергії, який у межах цього підходу може бути застосований до мережевих матеріалів, та принцип додаткової внутрішньої енергії, до якого внесено доданок, що відповідає проміжному шару.

Третій розділ містить теоретичні моделі матеріалів із мережевою мікроструктурою. Для сталих мереж із пружним відгуком запропоновано нове статистичне подання на основі урахування орієнтацій волокон у мережі. Автор для цього використовує одиничну мікросферу, на якій визначає змінні мікроскопічних деформацій. Далі за допомогою моделі шляхів максимального просування у мережі запропоноване кінематичне співвідношення, що пов'язує розподіл векторів розтягнення волокон із градієнтом макроскопічної деформації інтегральним співвідношенням. Розв'язок задачі математичного програмування з обмеженням, в ролі якого виступає це рівняння зв'язку, визначає рівноважний відгук мережі та осереднений тензор напружень, який обчислюється як інтеграл осьових сил волокон. Тим самим розв'язується основна задача, що сформульована у роботі: поєднання механічних властивостей деформівних тіл із поведінкою їхньої мікроскопічної будови.

Для урахування в'язкопружної поведінки в роботі запропонований інший підхід. Замість суцільної мережі зшитого полімеру розглядаються вільні ланцюжки. Для визначення їхніх деформацій замість одиничної сфери орієнтацій розглядається повний простір векторів подовження. Внаслідок зовнішньої деформації тіла, розподіл ланцюжків в цьому просторі зазнає афінного перетворення. Однак, внаслідок броунівського руху подовжені ланцюжки повертаються до початкового гаусівського розподілу. Цей процес подається у моделі за допомогою рівняння Смолуховського, яке відоме у статистичній механіці для точкових частинок. За аналогією автор розповсюджує його на вільні ланцюжки. Остаточно ці співвідношення отримані в компактній тензорній формі, а з термодинамічних міркувань отримано вираз в'язкопружних напружень.

Третій тип поведінки, який розглянуто в цьому розділі, стосується відносного проковзування волокон, яке є притаманним для нетканих матеріалів. Для них запропоновано модель пружного волокна із тертям у вузлах.

Четвертий розділ містить постановку контактної задачі між тілами, поверхні яких моделюються проміжним шаром з нелінійними властивостями. Внесок у локальну податливість враховується за допомогою нелінійного доданку у варіаційному принципі мінімуму додаткової енергії. Такий підхід дає змогу розглядати довільні залежності між поверхневим зминанням та контактним тиском. Апроксимація поставленої контактної задачі

здійснюється за допомогою методу граничних елементів. Шуканий розподіл контактного тиску наближається кусковолінійною комбінацією пірамідальних базисних функцій, визначених на регулярній трикутній сітці. Запропоновано два способи отримання системи розв'язувальних рівнянь та нерівностей як із прямої, так і зі слабкої варіаційної постановки. У зв'язку із нелінійністю проміжного шару були розроблені спеціальні методи додаткових зазорів та змінних параметрів податливості для розв'язання дискретизованої задачі. Ефективність запропонованого підходу одразу продемонстровано на прикладі декількох модельних задач, в яких розглядалися різні види нелінійного відгуку проміжного шару. По-перше, підтверджено точність та збіжність чисельного методу, продемонстрована поведінка похибки. По-друге, наведені чисельні розв'язки показали істотний вплив податливості шару на характер контактної взаємодії, який може бути принципово відмінним від випадку контакту гладких тіл.

У *п'ятому розділі* вирішується питання обґрунтування раціональної форми поверхонь та податливості зовнішніх або проміжних шарів між тілами з точки зору отримання поліпшених технічних рішень для елементів машин і механізмів. Запропоновані постановки обернених задач, які дають змогу визначати розподіл сприятливого для зменшення напружень профілю зазору між тілами та параметрів шорсткості контактуючих поверхонь. Досліджено чутливість розподілу контактного тиску, форми плями контакту від вказаних вище факторів. Наведені результати свідчать про можливість, з одного боку, впливу на контактну міцність різними способами у процесі проектування, з іншого боку, – контролю за можливими відхиленнями технологічного чи експлуатаційного походження та їхніми наслідками для конструкції.

У *шостому розділі* моделі та методи, розроблені в розділах 2-5, були застосовані для здійснення прикладних досліджень.

Була розв'язана низка задач гомогенізації відгуку матеріалів типу гуми. Показано, що моделі шляхів максимального просування на дифузії вільних ланцюжків здатні відтворювати добре відомі особливості поведінки еластомерів. Зокрема, встановлено принципово неафінний характер деформування мережі для декількох практично важливих випадків, яким пояснюються такі фізичні явища, як різниця відгуку гуми за одновісного та двовісного розтягнення або додатні нормальні напруження гідрогелів за зсуву. На підтвердження цих висновків також наведені результати здійсненого дискретно-елементного моделювання представницьких комірок випадкових волоконних мереж. Розроблені теоретичні моделі волоконних матеріалів отримали чисельну реалізацію та були адаптовані для використання у скінченно-елементному аналізі, що важливо для їхнього практичного використання в інженерній практиці.

Розглянуто також окремий клас задач адгезійного контакту пружних тіл. Для них раніше розроблений підхід було відповідним чином модифіковано. Для цього у варіаційну постановку введено новий вираз поверхневої складової, відповідно до якого енергія адгезії обчислюється за

площею плями контакту. З умов стаціонарності функціоналу додаткової енергії, який було дискретизовано в осесиметричному випадку, отримана система розв'язувальних співвідношень відносно невідомого радіусу плями контакту та вузлових значень контактного тиску, яку розв'язано методом Ньютона-Рафсона. За допомогою розробленого чисельного методу досліджено адгезійний контакт хвилястої сфери з пружним напівпростором. Отримані криві притискання-роз'єднання цих тіл, які відзначаються нестійким характером. Процес їхньої взаємодії супроводжується послідовними нестійкими станами, між якими відбуваються різкі переходи, за яких розмір плями контакту змінюється раптово.

Здійснено ґрунтовне дослідження контактної взаємодії елементів гідрооб'ємної передачі для перспективної танкової трансмісії. Проаналізовано як вплив контактної жорсткості, так і форми бігових доріжок статора у сполученні із кульковими поршнями. Виходячи з конструктивних обмежень, були запропоновані рекомендації, що забезпечують зниження напружень та забезпечення міцності цих елементів передачі.

У *сьомому розділі* переважно містяться порівняння теоретичних моделей із експериментальними даними, а також наведені потенційні напрямки впровадження результатів у виробництво. Зокрема, здійснено аналіз поведінки нетканих матеріалів, які мають широке застосування, в тому числі, як елементи балістичного захисту. Інший клас сучасних матеріалів, які було розглянуто в цьому розділі, становлять гелі та еластомери з неоднорідним складом мережі. Для них було застосовано удосконалений варіант методу осереднення. Було здійснене порівняння з експериментальними даними для бімодальних мереж, яке продемонструвало здатність моделі адекватно визначати відгук таких матеріалів за їхньою композицією. Особливої уваги застосовують експериментальні дослідження контактної взаємодії із урахуванням податливості проміжного шару, здійснені із використанням спеціальних плівок. Отримані відбитки наочно демонструють особливості форми контактних плям та розподілів контактного тиску, які раніше були чисельно встановлені для реальних машинобудівних конструкцій. Тим самим остаточно обґрунтовується можливість впровадження наданих рекомендацій у інженерну практику.

У *цілому* дисертація Ткачука Миколи Миколайовича є завершеною науковою роботою, в якій поставлено та розв'язано важливу наукову проблему побудови адекватних мікромеханічно-обґрунтованих моделей матеріалів з мережевою будовою, а також податливості проміжних шарів у контакті пружних тіл. Робота має вагомe значення для науки та промисловості України. Робота викладена якісно, її оформлення відповідає вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора технічних наук.

Практична цінність дисертації полягає у створенні теоретичних основ та засобів дослідження нових матеріалів та елементів конструкцій, як існуючих, так і таких, що тільки створюються. Розроблені комплекси програм обчислення властивостей матеріалів та контактної взаємодії мають

безпосереднє використання у промисловості.

Впровадження результатів

Основні наукові положення та практичні рекомендації дисертаційного дослідження використані у проектуванні деталей машин і агрегатів, а також конструкційних елементів виробів цивільного та військового призначення у процесі виконання робіт на замовлення промислових підприємств та інших установ: Державного підприємства «Завод ім. В.О. Малишева», Державного підприємства «Харківське конструкторське бюро з машинобудування ім. О.О. Морозова», Державного підприємства «Харківське конструкторське бюро з двигунобудування», Державного концерну «Укроборонпром», ПАТ «Азовмаш». У цих організаціях здійснено впровадження результатів досліджень у практику, про що свідчать відповідні акти, додані до дисертації. Впровадження результатів дослідження має значний економічний ефект.

Також теоретичні розробки та програмні комплекси впроваджено у навчальний процес у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», що також підтверджується актом і довідкою про впровадження.

Оцінка мови та стилю викладення дисертації та автореферату

Дисертація та автореферат викладені українською мовою. Текст викладено логічно, послідовно, технічно грамотно. Термінологія, яку використовує автор, у цілому відповідає прийнятій у механіці. Слід зазначити, що в роботі використовується багато термінів, які є перекладом з англійської, а також авторських позначень, що не є широко вживаними. У роботі багато ілюстраційного матеріалу високої чіткості, описи до рисунків є змістовними та вичерпними.

Повнота викладу основних результатів дисертації у наукових фахових виданнях

Основні положення дисертаційної роботи досить повно представлені у виданнях, які належать до переліку рекомендованих для опублікування результатів дисертаційних робіт. Є публікації у виданнях із бази Scopus та інших авторитетних виданнях, у т.ч. – зарубіжних.

Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації

Зміст автореферату в цілому відповідає змісту розділів дисертації, містить основні результати здійснених досліджень і дає змогу достатньо повно оцінити наукову новизну і практичну цінність.

Недоліки

До дисертації можна зробити деякі зауваження:

1. Більшість волоконних матеріалів є анізотропними, натомість усі результати в роботі отримані для ізотропних мереж. Автором не вказано, чи існують принципові перешкоди для поширення запропонованого підходу на анізотропні матеріали, та причини, з яких це не було здійснено.

2. Недостатньо детально викладена процедура чисельної реалізації методів осереднення, зокрема, при їх використанні у скінченно-елементному аналізі. Були би корисними принаймні алгоритмічні описи без зайвих

технічних подробиць. Для контактних задач це було здійснено.

3. Запропонована автором постановка контактної задачі враховує лише нормальні компоненти переміщень у області контакту тіл. Однак, дотичні переміщення та сили тертя відіграють значну роль у контактній механіці. Зокрема, це мало б суттєвий вплив для поверхневих і проміжних шарів та для гуми, яка має великі значення коефіцієнтів тертя.

4. При побудові моделі матеріалу з мережевою структурою наскільки обґрунтованим є припущення, що початкова довжина для всіх волокон у мікросфері є однаковою.

5. Модель Максвелла добре описує вязкопружні властивості лише для вузького кола марок еластомерів. Не краще було б використати більш загальну інтегральну модель на основі теорії Больцмана-Вольтера.

6. У роботі побудовано випадковим чином фрагмент волокнистої мережі, наскільки репрезентативним він є, і яким методом він згенерований.

7. При розв'язанні задач досить широко використано метод граничних та скінченних елементів, але не наведено інформації про збіжність результатів розрахунків при згущенні сітки дискретизації. Це є суттєвим особливо при визначенні зони контакту взаємодіючих об'єктів. Крім того, у більшості задач не описано які саме типи скінченних елементів використовуються. Це має велике значення при дослідженні конструкцій із специфічних матеріалів. Так, не зрозуміло як враховувалась слабка стисливість матеріалу при дослідженні гумових зразків.

Вказані зауваження та недоліки варті обговорення під час захисту, однак не знижують загальної позитивної оцінки дисертації.

Висновок про дисертацію в цілому та відповідність її чинним вимогам

На підставі вищевикладеного, вважаю, що дисертаційна робота Ткачука Миколи Миколайовича «Мікромеханічні моделі та методи осереднення властивостей матеріалів мережевої структури та проміжних шарів контактуючих тіл» є завершеною науковою працею, в якій містяться нові наукові результати, спрямовані на вирішення важливої науково-прикладної проблеми, що полягає в аналізі механічних властивостей матеріалів мережевої будови та контактної взаємодії тіл за наявності проміжних поверхневих шарів на основі урахування мікромеханіки деформування.

Було досягнуто поставлену мету дослідження – розроблені принципово нові підходи та методи осереднення мережевих мікроструктур та проміжних поверхневих шарів. Створені на їх основі обчислювальні моделі мають переваги перед існуючими як за точністю, так і за принципово новими можливостями аналізу властивостей матеріалів і конструкцій за мікроскопічними параметрами їхньої внутрішньої будови. Ці переваги були продемонстровані прикладами застосування мікромеханічно обґрунтованих моделей в інженерному аналізі нових виробів військового та цивільного призначення. Отримані нові закономірності поведінки матеріалів і конструкцій, а також рекомендації щодо підвищення їхніх характеристик.

Це дає змогу зробити висновок про те, що дисертаційна робота «Мікромеханічні моделі та методи осереднення властивостей матеріалів мережевої структури та проміжних шарів контактуючих тіл» повністю відповідає вимогам пунктів 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.13 р. № 567, а її автор, Ткачук Микола Миколайович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри
фундаментальної математики
Запорізького національного
університету, д.т.н., доц.

Сергій ГРЕБЕНЮК

Підпис
Сергія ГРЕБЕНЮКА

засвідчую:

Вчений секретар
Запорізького національного університету
кандидат філологічних наук, доцент



О.А. Проценко