

ВІДГУК

офіційного опонента, провідного наукового співробітника відділу механіки стохастично неоднорідних середовищ Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка Національної академії наук України, доктора фізико-математичних наук, старшого наукового співробітника Кирилюка Віталія Семеновича на дисертацію Ткачука Миколи Миколайовича **«МІКРОМЕХАНІЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ОСЕРЕДНЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ МЕРЕЖЕВОЇ СТРУКТУРИ ТА ПРОМІЖНИХ ШАРІВ КОНТАКТУЮЧИХ ТІЛ»**, подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

1. Актуальність теми дисертації.

Одним із найбільш вагомих викликів для механіки деформівного твердого тіла на сучасному етапі є розробка моделей деформування тіл із матеріалів мережевої структури. Така обставина продиктована бурхливим зростанням області застосування таких матеріалів для захисних, силових та функціональних елементів у озброєнні та військовій техніці, в енергетичному та транспортному машинобудуванні, у технологічному обладнанні тощо. З цією метою розробляються різноманітні типи матеріалів: волоконні мережі, неткані, гелі, гуми. Вони володіють унікальними поєднаннями властивостей міцності, легкості, суттєвого енергопоглинання та здатності до значного деформування без втрати цілісності. Разом із тим моделі деформування таких матеріалів, які натеper розроблені, призводять до відчутної невідповідності результатів аналітичного та чисельного дослідження напружено-деформованого стану реальній поведінці тіл, яка визначається у ході лабораторних випробувань, а також при експлуатації виробів із таких матеріалів. Причому це не тільки кількісна невідповідність. У деяких випадках не співпадає навіть характер розподілу компонент напружено-деформованого стану.

Протиріччя, що виникли у механіці стосовно моделей деформування мережевих матеріалів, можуть бути вирішені на базі розробки нових теоре-

тичних підходів, які базуються на аналізі мікроструктури подібного класу матеріалів. Отже, об'єктивно набула актуальності важлива і значна науково-практична проблема теоретичного обґрунтування таких моделей та визначення за їх допомогою закономірностей деформування конструкцій, які виготовлені із матеріалів із мережевою структурою.

Інша область механіки, яка потребує розробки нових мікромеханічних підходів, – це контактна взаємодія тіл близької форми. Для таких випадків суттєвими стають властивості шорсткості, напилень, плівок, прокладок, тобто нелінійно-пружних проміжних шарів.

Схожі методологічні аспекти та вихідні мікромеханічні підходи дають підґрунтя для об'єднання цих двох рукавів у єдиній проблемі розробки нових моделей мікромеханіки матеріалів мережевої мікроструктури у об'ємі та проміжних шарів на поверхні контактуючих тіл задля дослідження деформування елементів конструкцій та забезпечення їх підвищених технічних характеристик.

На вирішення цієї проблеми спрямована докторська дисертація М.М. Ткачука, що свідчить про актуальність теми роботи, яка подана до розгляду.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації.

У наукових розробках, як правило, застосовуються різноманітні гіпотези, припущення. Часто вводяться до розгляду додаткові допоміжні чинники чи параметри, які не мають прямого фізичного сенсу. Нерідко залучаються також недостатньо строгі міркування при побудові тих чи інших математичних моделей. Усі перелічені обставини породжені недоліками теоретичної бази, якою оперує певний дослідник, недостатнім обсягом знань про об'єкт досліджень або прагненням якомога швидше досягти необхідного результату. У випадку роботи, яка розглядається, усі названі негативні чинники зведені до мінімуму. По-перше, до множини базових гіпотез залучені тільки найбільш очевидні та природні щодо мікроструктурних особливостей мережевих матеріалів у об'ємі чи проміжних шарів на поверхні контактуючих тіл. По-друге, ніяких додаткових параметрів, які не несуть фізичного сенсу, не вводиться до розгляду. По-третє, залучається строгий математичний апарат для оперування з вихідними співвідношеннями, які, у свою чергу, базуються на фундаментальних фізичних законах і принципах.

Таким чином, методологічно забезпечено максимальну ступінь обґрун-

туваності наукових положень, сформульованих у дисертації. Відповідно, усі подальші дослідження, які базуються на таких обґрунтованих моделях і методах, що пройшли глибоку апробацію, призвели до установлення об'єктивно існуючих закономірностей. А це, у свою чергу, дало підстави для формування у дисертації обґрунтованих висновків та рекомендацій.

3. Достовірність результатів досліджень, описаних у дисертації, забезпечується дотриманням строгих процедур побудови моделей, розробки методів розв'язання систем рівнянь і нерівностей, а також застосуванням апробованих програмних засобів для реалізації розрахунків. Крім того, автор постійно звертається для обґрунтування адекватності побудованих математичних та деталізованості чисельних моделей, а також точності одержуваних за їх допомогою результатів розв'язання низки задач, до порівняння із даними інших авторів, а також із даними власних експериментальних досліджень. І кожен раз досягається високий ступінь відповідності результатів. Це є вагомим додатковим аргументом на користь достовірності отриманих результатів та обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації.

4. Наукова новизна отриманих результатів

З точки зору наукової новизни слід одразу зазначити, що у роботі сформовано теоретичні основи двох нових започаткованих напрямків у механіці деформівного твердого тіла: мікромеханіка матеріалів мережевої структури та мікромеханіка контактної взаємодії тіл із фізично нелінійними проміжними шарами. Від цього центрального стрижня відгалужуються компоненти наукової новизни, кожен із яких має таку вагомість, що може бути покладеним в основу подальших нових наукових напрямків. Тут із деякими правками можна погодитися із редакцією, наведеною у дисертації: у цілому наукова новизна отриманих результатів полягає у створенні *теоретичних основ* аналізу деформування нетрадиційних мережевих матеріалів, напружено-деформованого стану із урахуванням контактної взаємодії складнопрофільних тіл із нелінійно пружними проміжними шарами, а також в обґрунтуванні властивостей нетрадиційних матеріалів і форми поверхонь контактуючих тіл.

Отримані такі нові наукові результати.

1. *Уперше* на основі принципово нових підходів до опису фізико-механічних властивостей на мікрорівні статистичних наборів волоконних ланцюжків і просторової гомогенізації їх макровластивостей розроблено нелінійні математичні моделі деформування матеріалів у вигляді хаотичної ме-

режевої структури одновимірних фрагментів. Порівняно із традиційними створені моделі більш адекватно описують особливості деформування матеріалів у вигляді просторових хаотичних та упорядкованих мережових структур, оскільки не залучають низки додаткових «нефізичних» гіпотез. Це створює принципово нові можливості не тільки для аналізу властивостей таких матеріалів, але й для створення нових із заданими властивостями.

2. *Уперше* розроблено нелінійні математичні моделі деформування контактуючих тіл із урахуванням властивостей поверхневих або проміжних шарів, які побудовані на основі поєднання моделей контактування мікронерівностей і умов взаємонепроникнення тіл. Ці моделі, по-перше, фізично більш адекватно відображають механізм контактної взаємодії тіл, а, по-друге, на відміну від традиційних лінійних умов кінематичного контакту, призводять до більш складних, проте більш точних, нелінійних математичних моделей (тобто до формування названих у роботі «структурно-фізично нелінійних задач»). Це створює нові можливості аналізу контактної взаємодії елементів реальних конструкцій.

3. Отримав *подальший розвиток* метод граничних елементів у напрямку розв'язання структурно-фізично нелінійних задач контактної взаємодії, які містять нелінійні, а не лінійні, як у традиційних підходах, члени в умовах сумісності переміщень на границях контактуючих тіл. Із цією метою розроблено модифікацію варіаційного принципу Калькера на випадок фізично нелінійних проміжних шарів. Це створює можливість дискретизації задачі із залученням апроксимацій шуканого розподілу контактного тиску на мережі граничних елементів. Відповідно, різко знижується розмірність дискретної моделі порівняно, наприклад, із застосуванням методу скінченних елементів. При цьому досягається значне підвищення оперативності розв'язання задач аналізу контактної взаємодії складнопрофільних тіл зі збереженням точності.

4. *Уперше* створено підхід до формування системи розв'язувальних співвідношень на основі поетапного поповнення множини чинників, які ураховуються при аналізі контактної взаємодії елементів машинобудівних конструкцій. Він відрізняється від традиційних тим, що при додаванні нових чинників у модель контактної взаємодії пружних тіл модифікований функціонал додаткової енергії, визначений на розподілі контактного тиску, поповнюється відповідними додатковими доданками. Із використанням властивості адитивності стає можливим без додаткових процедур, що супроводжують традиційні підходи, формувати розв'язувальні співвідношення. Із урахуванням подальшої дискретизації задачі на єдиному полі розподілу контактного тиску стає

можливим природний перехід до розв'язувальної системи нелінійних алгебраїчних рівнянь та нерівностей.

5. *Уперше* розроблено методи додаткових зазорів і змінних податливостей для розв'язання структурно-фізично нелінійних задач аналізу контактної взаємодії шляхом зведення їх до серії структурно нелінійних, проте фізично лінійних задач. На відміну від традиційних, розроблені методи мають природну можливість зміни кількості розв'язувальних рівнянь, оскільки автоматична перевірка умов контактного сполучення або поповнює множину вузлів, у яких задіяні ці обмеження (тобто вони активні), або, навпаки, – зменшує. Таким чином, зменшується ступінь вкладеності та підвищується швидкість ітераційних процесів при уточненні поточного розв'язку задачі про контактну взаємодію порівняно із традиційними методами. Крім того, досягається природне трактування задач про контактну взаємодію за наявності нелінійно пружних проміжних шарів як задачі із лінійно пружними шарами, проте із коригованими зазором або розподілом характеристик податливості.

6. *Уперше* на основі чисельного моделювання встановлено закономірності деформування матеріалів із мережевою структурою під механічним навантаженням. Зокрема, на протигагу традиційним моделям типу «правила сумішей» чи більш складних, але таких, що не враховують складний зв'язок мікроструктури та макровластивостей такого типу матеріалів, одержані неунімодальні залежності фізико-механічних характеристик матеріалу, складеного із полімерних матеріалів із різною довжиною макромолекул. Це дає змогу більш точно прогнозувати властивості створюваних матеріалів, а також установлювати вміст різних складових, який призводить до реалізації заданих результуючих властивостей матеріалу-суміші.

7. *Уперше* розроблено методи розв'язання задач мікромеханіки волоконних, нетканих і полімерних матеріалів, що відрізняються підходом до формування їх властивостей шляхом гомогенізації на основі створених нових моделей осереднення. Ці моделі, на відміну від традиційних, у яких вводяться додаткові «нефізичні» гіпотези, базуються на строгих термодинамічних співвідношеннях та природних підходах до осереднення. Цим створюються можливості більш високої точності мікромакроспіввідношень, що пов'язують мікроструктуру та макровластивості матеріалів мережевої структури із одновимірних елементів. Більш того, забезпечується відтворення у ході чисельного моделювання якісних особливостей характеру деформування такого типу матеріалів. І, нарешті, створюються передумови для визначення шляхів досягнення заданих макровластивостей цих матеріалів шляхом цілеспрямованого

ваного вибору їх складу та мікроструктури.

5. Практична цінність результатів дисертаційних досліджень

На додачу до вирішення важливої наукової, у роботі міститься також повноцінне вирішення значної прикладної проблеми. Суть цієї компоненти роботи – у створенні засобів аналізу деформування тіл із матеріалів із мережевою структурою і конструкцій із елементів, що контактують через фізично нелінійні проміжні шари. Крім того, розроблені засоби обґрунтування технічних рішень для створення матеріалів і конструкцій, які мають задані службові, захисні, функціональні характеристики за критеріями маси, міцності, довговічності тощо.

Розроблені засоби були застосовані до розв'язання низки прикладних задач: напружено-деформований стан елементів гідروпередач ГОП-900 для перспективної танкової трансмісії, контактна взаємодія тіл із хвилястим профілем поверхні, міцність та жорсткість елементів прес-форм, роликів, верстатних пристосувань, міцність та деформування нетканих матеріалів, напружено-деформований стан елементів із нітрил-бутадієнового каучука, бімодальних матеріалів, гелів тощо.

Прикладні задачі, що розв'язані у дисертації, знайшли своє упровадження у низці господарчих договорів, бюджетних тем, грантів, договорів про співробітництво. Отримані результати дали суттєвий економічний ефект – 2,2 млн. грн.

6. Повнота викладу результатів дисертаційних досліджень у опублікованих працях.

Матеріали дисертації знайшли широке відображення у публікаціях, серед яких 2 монографії, 53 статті у фахових виданнях, у т.ч. 6 – у виданнях за базою Scopus, а також 53 публікації у матеріалах і тезах конференцій.

Усі основні матеріали досліджень здобувача опубліковані у такій формі та із таким змістом, що відображають основні положення розділів дисертації. Особливо варто відзначити численні зарубіжні та вітчизняні представницькі профільні конференції, на яких оприлюднені не тільки тези і матеріали, але й здійснені повноцінні доповіді. Це свідчить про якнайширше доведення матеріалів роботи до наукової спільноти, про їх обговорення та схвалення, причому також у режимі живої дискусії.

Таким чином, за кількісними вимірами та повнотою викладу публікації здобувача повністю відповідають чинним вимогам стосовно докторських дисертацій.

7. Оцінка мови та стилю викладу матеріалу в дисертації.

Дисертація та автореферат викладені українською мовою із дотриманням термінології, що прийнята у механіці. Матеріал у дисертації структурований за сімома розділами більш-менш рівномірно. У другому розділі наведена структура дослідження, яка дотримана у рукописі при викладенні матеріалу.

Автореферат, попри обмежений його обсяг, дає достатнє уявлення про зміст самої дисертації.

Матеріали кандидатської дисертації у частині результатів не виносяться на захист докторської.

Стиль викладання матеріалу у дисертації та автореферату відповідає загальноприйнятим вимогам. Здобувач продукував достатню, а подекуди – й надлишкову кількість ілюстрацій і таблиць, що допомагає визначити змістовну суть рукопису та автореферату.

8. Оцінка змісту роботи.

Рукопис роботи містить сім основних розділів.

У вступі визначено основні кваліфікаційні ознаки дисертації. Вони випи-сані чітко, обґрунтовано та взаємно відповідають темі, завданням, методам, об'єкту, предмету, науковій новизні та змісту основних розділів і висновків.

Зміст *автореферату* повністю відображає основні положення дисертаційної роботи.

Розділ 1 знайомить із сучасним станом досліджень за темою роботи. Здійснений аналіз дав підстави для вибору напрямків і шляхів вирішення завдань досліджень

У *розділі 2* стисло викладено методи і засоби досліджень, які розкриті у наступних розділах. Також наведена структурна схема роботи, що є позитивною її ознакою.

У *розділі 3* описані авторські підходи до опису мікро- та макромоделей деформування матеріалів мережевої структури. За цим напрямком викладені базові теоретичні положення, побудовані на фізичних законах і принципах, на новому підході до осереднення властивостей статистичних наборів одновимірних елементів, а також на основі строгих математичних викладок.

Розділ 4 відображає моделі аналізу контактної взаємодії на основі модифікації варіаційного принципу Калькера. Запропонована гранично-елементна дискретизація шуканого розподілу контактної тиску між тілами із нелінійним проміжним шаром. Для розв'язання системи рівнянь та нерівностей розроблені методи ітераційного уточнення - додаткових зазорів і змінних параметрів пода-

тливості. На завершення наведено аналіз контактної взаємодії тіл із декількома типами нелінійно пружних проміжних шарів.

Розділ 5 описує постановку задачі про обґрунтування геометричної форми і властивостей проміжного шару між контактуючими тілами. Наведено аналіз чутливості розв'язків тестових контактних задач до варіювання розподілу зазору між тілами та податливості проміжного шару.

Розділ 6 містить опис розв'язання прикладних задач про деформування тіл, виготовлених із матеріалів із мережевою структурою, а також про напружено-деформований стан тіл із урахуванням контактної взаємодії через нелінійно пружний шар.

Розділ 7 відображає розрахунково-експериментальні дослідження напружено-деформованого стану зразків, фрагментів та тестових і дослідних конструкцій (із гуми та гелю, верстатні пристосування, поршні гідропередачі, роликки, прес-форми тощо). Також описано впровадження результатів роботи.

Висновки відображають результати роботи.

У роботі є солідний *список літературних джерел* із 482 найменувань та шість додатків із додатковими матеріалами, актами та довідкою про впровадження.

У *цілому* дисертація відповідає встановленим вимогам за обсягом та наповненням, а також, як уже зазначалося, розкриває мету, завдання, наукову новизну та практичну цінність, які сформульовані у вступі.

9. Зауваження до дисертаційної роботи.

1. Дисертація містить низку положень, які не мають свого подовження та реалізації. Наприклад, у розд. 4 серед методів розв'язання системи рівнянь і нерівностей для аналізу контактної взаємодії пропонуються різні варіанти релаксаційних процедур. Разом із тим ні далі у розд. 4, ні у розд. 5-7 згадування про такі процедури відсутнє. Виникає резонне питання про доцільність розміщення цих матеріалів.

2. Для більшої обґрунтованості розроблених моделей деформування мережевих матеріалів варто було би здійснити власні експерименти. У роботі ж іде посилення тільки на експерименти інших дослідників.

3. Здобувач не визначає у роботі обмежень на область застосування розроблених моделей деформування мережевих матеріалів.

4. У розд. 4 описано дослідження впливу варіювання розподілу зазору між тілами на їх контактну взаємодію для обмеженої множини варіантів. Ставить інтерес більш широка постановка задачі.

5. У роботі багато ілюстрацій, які подані у гамі дуже блідних кольорів, наприклад, див. розд. 4, рисунки у табл. 4.1. Це створює труднощі сприйняття не тільки при роздруковці у відтінках сірого, але й навіть при роздрукуванні у натуральних кольорах.

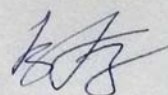
10. Висновок про дисертацію в цілому та відповідність її чинним вимогам.

В цілому дисертація Ткачука Миколи Миколайовича є завершеною науковою дослідницькою роботою, у якій викладено вирішення важливої наукової та прикладної проблеми. Робота має вагоме значення для науки та промисловості.

Розв'язана наукова проблема, її наукова новизна, а також практична спрямованість одержаних результатів та їх впровадження в сукупності мають вагоме значення для науки та практики, що підтверджує відповідність дисертаційної роботи чинним вимогам.

Вважаю, що в дисертаційна робота відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, зокрема п.п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», відповідає спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла, а її автор, Ткачук Микола Миколайович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук.

Офіційний опонент,
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник відділу
механіки стохастично неоднорідних середовищ
Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка
НАН України

 В.С. Кирилюк


Підпис Кирилюка В.С. засвідчую

Вчений секретар Інституту механіки

ім. С.П. Тимошенка НАН України

доктор фізико-математичних наук



 О.П. Жук