

ВІДГУК офіційного опонента

на дисертацію Миколи Миколайовича Ткачука
"Мікромеханічні моделі та методи осереднення властивостей матеріалів мережевої структури та проміжних шарів контактуючих тіл",
яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Відгук складено на основі аналізу рукопису дисертації, автореферату та друкованих праць.

Актуальність теми дисертації

З появою нових матеріалів складної структури виникають проблеми математичної формалізації їх фізико-механічних властивостей, без чого неможливо спрогнозувати надійну роботу виробів з цих матеріалів за допомогою числового моделювання. Це, зокрема, стосується нових нетрадиційних матеріалів об'ємної мережевої мікроструктури. Близька за суттю проблема виникає і при спробі моделювання властивостей мікроструктури поверхневих шарів тіл навіть із традиційних матеріалів.

Проблема математичної формалізації фізико-механічних властивостей не нова, напрацьовано багато підходів та моделей. Для складних мікроструктур вона може бути вирішена лише шляхом створення адекватних мікромоделей, коректного переходу від мікромоделей до макромоделей. Цей перехід ще називають осередненням або знаходженням "еквівалентних" характеристик. При такому переході важливо виявити та зберегти впливові фізичні параметри середовища, а також не ввести нові, чисто формальні нефізичні параметри. Це зробити дуже складно.

Отже, є масштабна та важлива *наукова* проблема розробки теоретичних основ для створення моделей деформування твердих тіл із урахуванням просторової мережевої структури та властивостей поверхневих шарів контактуючих тіл. Якраз на вирішенні цієї актуальної проблеми спрямована методологічна частина дисертації.

Якщо звернутися до практичного аспекту, то спостерігається просування у конструкціях машин військового та цивільного призначення елементів із матеріалів мережевої мікроструктури. Це і балістичний захист, і ізолятори, і пружні та демпфіруючі структури, тощо. З іншого боку, є прагнення зблизити геометричну форму поверхонь контактуючих тіл задля підвищення ресурсу шляхом зниження інтенсивності напружень у поверхневих шарах. При цьому різко зростає важливість властивостей поверхневих шарів, що контактують. Наприклад, це елементи трансмісій, двигунів, прес-форм, тощо.

І у першому, і у другому із перелічених випадків наука і практика стикаються із двома проблемами. Перша полягає у вадах розроблених моделей деформування матеріалу, які би пояснили неочевидну чи навіть парадоксальну механічну поведінку елементів конструкцій або їх з'єднань, друга – в тому, що натепер не отримала достатнього рішення проблема обґрунтування таких мікроструктурних моделей, які би забезпечили необхідні властивості елементів нових конструкцій.

Отже, має місце значна *прикладна* проблема аналізу напружено-деформованого стану та обґрунтування прогресивних технічних рішень конструкцій із високими експлуатаційними властивостями, що містять тіла із матеріалів із мережевою мікроструктурою або контактуючі деталі із модифікованими поверхневими шарами. У роботі, що подана до захисту, ця сформована прикладна проблема набула конкретного вирішення.

Підсумовуючи, маємо повну підставу стверджувати, що тема роботи актуальна, причому як у сенсі вирішення важливої наукової, так і значної прикладної проблеми.

У дисертації наведені відомості про те, що робота має зв'язок із декількома науковими темами, планами та договорами. Зокрема, здобувач був виконавцем та науковим керівником профільних тем. Ці держбюджетні теми виконувалися в рамках тематичних планів за конкурсним фінансуванням МОН України, мають державну реєстрацію та звітність.

Наукова новизна отриманих результатів

Принципово погоджуючись із зробленим здобувачем розлогим описом наукових здобутків дисертаційної роботи, конспективно ці здобутки викладемо у такому вигляді:

1. Розроблено нелінійні математичні моделі деформування матеріалів у вигляді хаотичної мережевої структури одновимірних фрагментів.

2. Розроблено нелінійні математичні моделі деформування контактуючих тіл із урахуванням властивостей поверхневих або проміжних шарів, які побудовані на основі поєднання моделей контактування мікронерівностей і умов непроникнення тіл одне в одне.

3. Отримав *подальший розвиток* метод граничних елементів у напрямку розв'язання структурно-фізично нелінійних задач контактної взаємодії, які містять нелінійні члени в умовах сумісності переміщень на границях контактуючих тіл. Із цією метою розроблено модифікацію варіаційного принципу Калькера на випадок фізично нелінійних проміжних шарів.

4. Створено підхід до формування системи розв'язувальних співвідношень на основі поетапного поповнення множини чинників, які ураховуються при аналізі контактної взаємодії елементів машинобудівних конструкцій.

5. Розроблено методи додаткових зазорів і змінних податливостей для розв'язання структурно-фізично нелінійних задач аналізу контактної взаємодії шляхом зведення їх до серії структурно нелінійних, але фізично лінійних задач.

6. На основі чисельного моделювання встановлено закономірності деформування матеріалів із мережевою структурою під механічним навантаженням. Зокрема, одержані неунімодальні залежності фізико-механічних

характеристик матеріалу, складеного із полімерних матеріалів із різною довжиною макромолекул.

7. 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.

Об'єднує всі ці здобутки створена можливість проводити чисельні розрахунки контактних взаємодій тіл з неповно або повністю погодженою геометрією та із врахуванням шорсткості контактних поверхонь, які частково або всі зроблені із сучасних матеріалів, зокрема, й мережевої структури, або мають проміжні чи приповерхневі шари, які можна моделювати нелінійними співвідношеннями.

Практичне значення отриманих результатів

Теоретичні розробки дисертації доведені до практичного використання, про що свідчать наведені документи. Проаналізовано деякі волоконні матеріали, зокрема, неткани, штучні каучуки, гелі, а також гідروпередачі для перспективної танкової трансмісії, підшипники, універсально-збірні пристосування, прес-форми тощо. На основі здійснених досліджень установлені закономірності та розроблені конкретні рекомендації. Впровадження розробок дало значний економічний ефект.

Ступінь обґрунтованості наукових положень та достовірність результатів

У теоретичних розробках моделей матеріалів мережевої структури здобувач застосовував підхід "знизу–догори", тобто переходячи від мікроструктурного до макроструктурного. Застосовувалися фундаментальні закони збереження та рівноваги, термодинамічні принципи. Кінцеві математичні моделі отримали загальне варіаційне формулювання. Не залучалися нефізичні припущення або некоректні міркування та висновки. При розробці контактних алгоритмів теж використовувалося варіаційне формулювання.

Наукові положення, висновки за результатами здійсненого дослідження та рекомендації щодо застосування й практичного використання у дисертації достатньо обґрунтовані, отримали широку апробацією в опублікованих наукових працях, частина з яких – у найавторитетніших зарубіжних виданнях, і доповідях на конференціях різних рівнів, зокрема – на світових профільних форумах.

Достовірність отриманих чисельних результатів базується на застосуванні сертифікованих програмних комплексів, порівнянням результатів тестових та дослідних розрахунків з власними експериментальними та відомими аналітичними результатами.

Результати, що отримані в дисертаційній роботі, пояснюють деякі неочевидні особливості поведінки реальних матеріалів та елементів конструкцій під навантаженням. Це стосується деформування волоконних матеріалів, гум, гелів тощо, а також контактної взаємодії тіл із проміжними шарами зі складними фізичними властивостями, для яких характерні нетрадиційні форми областей контакту та розподіли контактного тиску. Разом із тим такі якісні особливості відтворюють моделі, що побудовані та описані у роботі.

Обсяг та структура дисертації

Дисертація викладена на 464 сторінках, складається зі вступу на 14 сторінках, семи розділів на 339 сторінках, висновків і рекомендацій на 6 сторінках, списку використаних джерел, який містить 482 найменування на 41 сторінці, та 6 додатків на 58 сторінках. Дисертація містить 231 рисунок, з них – 136 на 56 повних сторінках та 23 таблиці, з них – 17 на 24 повних сторінках.

Дисертація супроводжується анотаціями українською та англійською мовами.

Повнота викладу результатів дисертаційних досліджень в публікаціях

Результати дисертаційних досліджень опубліковані у двох монографіях (одна – одноосібна), 53 статтях, серед них 14 – у зарубіжних виданнях та виданнях, що входять до науково-метричних баз. Особливо слід зазначити статті у авторитетних журналах "Philosophical Magazine" та "Journal of the Mechanics and Physics of Solids". Крім того, є публікації у наукових виданнях Дніпра, Києва, Львова, Севастополя, Харкова. Крім того, є 53 публікації у матеріалах і тезах конференцій за профілем дисертації, зокрема – в Німеччині, Іспанії, США, Словаччині, а також Києві, Львові, Харкові та інших містах України. Усі 108 заявлених у дисертації публікацій спрямовані на висвітлення завдань дисертаційних досліджень.

Отже, за кількісними вимогами та повнотою викладу, публікації здобувача повністю відповідають чинним вимогам стосовно докторських дисертацій.

Характеристика змісту основних розділів дисертації

Робота містить анотації, вступ, сім розділів, висновки, список використаних джерел та додатки.

У **Вступі** обґрунтована актуальність роботи, визначені мета, завдання, окреслені напрямки та методи досліджень, сформульовані об'єкт, предмет досліджень та компоненти наукової новизни і практичної цінності. Міститься також інформація про публікації за темою роботи, а також її апробацію та структуру рукопису.

Перший розділ містить опис здійсненого аналізу стану публікацій із наукової проблеми, яка вирішується у роботі. На цій основі здійснено висновки про протиріччя між усвідомленою реальністю та поточним станом математичної формалізації проблеми й її вирішення. Це дало підстави для формулювання напрямків досліджень, описаних у подальших розділах.

Розділ 2 є загальнометодологічним для роботи у цілому. У ньому знайшли у стислому вигляді своє відображення основні ідеї, залучені та розвинені моделі та методи досліджень, а також визначені основні етапи подальших досліджень. Наприкінці розділу наведено загальну структуру досліджень у графічному вигляді, який сприяє формуванню повної уяви про логічний зв'язок теоретичних етапів, чисельного моделювання та експериментів, які становлять зміст розділів 3 ÷ 7. Це показує єдність, цілісність та завершеність роботи.

Розділ 3 присвячений опису моделей деформування матеріалів мережевої структури. Спочатку розглядається мікроструктура таких матеріалів. Здобувачем

пропонується до використання авторська концепція шляхів максимального просування у мережі, яка стає містком між моделями мікро- та макродеформацій матеріалу із мережевою структурою. Також на основі принципу мінімуму вільної енергії згідно стандартних міркувань термодинаміки визначається осереднений макроскопічний відгук матеріалу до макроскопічної деформації. Також будуються моделі в'язкопружності еластомерів та деформування нетканих матеріалів із дисипативними механізмами. Таким чином, у розділі 3 побудовані теоретичні підвалини моделей та досліджень матеріалів мережевої мікроструктури.

У **розділі 4** міститься опис моделей та методів досліджень контактної взаємодії складнопрофільних тіл із нелінійно пружними проміжними шарами. По-перше, побудована математична модель на основі модифікації варіаційного принципу Калькера стосовно таких задач. Далі для її реалізації використані методи граничних інтегральних рівнянь та граничних елементів. При цьому формується система рівнянь і нерівностей відносно невід'ємних вузлових значень контактної тиску на трикутній мережі, яка покриває область можливого контакту на поверхні тіл, що взаємодіють. Проміжний шар з нелінійними характеристиками додає у цю систему, окрім структурної, ще й фізичну нелінійність, що суттєво ускладнює її розв'язання. Розроблені та описані методи для розв'язання сформованої системи рівнянь і нерівностей, зокрема методи додаткових зазорів і змінних параметрів податливості. Ці методи зводять фізично нелінійну задачу до послідовності структурно нелінійних, проте фізично лінійних задач.

У розділі також міститься опис результатів розв'язання низки тестових задач та установлених закономірностей розподілів контактної тиску між тілами за наявності фізично нелінійних проміжних шарів.

Розділ 5 присвячений постановці обернених задач контактної взаємодії. Здобувач привертає увагу до того, що розв'язувальну систему співвідношень, описану у розділі 4, можна трактувати як у прямому, так і в оберненому сенсі. Це дає змогу ставити задачу про уточнення геометричної форми поверхонь та властивостей проміжного шару між контактуючими тілами на основі єдиної системи співвідношень, побудованої для аналізу контактної взаємодії, але вже відносно варіативної частини форм тіл і властивостей шарів за заданими областями контакту та розподілом контактної тиску (або певних інших критеріїв). Також у розділі наведені ілюстрації стосовно чутливості розв'язку задачі про контактну взаємодію до варіювання властивостей проміжного шару і геометричної форми профілю поверхонь контактуючих тіл.

У **розділі 6** описані результати розв'язання низки прикладних задач. Зокрема, досліджено деформування нітрил-бутадієнового каучуку. Виявлено задовільну збіжність результатів чисельних розрахунків зі запропонованою моделлю цього матеріалу із експериментом. Зокрема, величина в'язкопружних напружень точно узгоджується для стиснення і помірних розтягнень.

Із застосуванням розроблених у роботі підходів розв'язана задача пружної гомогенізації бімодальних мереж. Мова йде про властивості матеріалу, одержаного поєднанням двох компонент із різними властивостями структурних елементів (фракцій). Установлені співвідношення для пружних властивостей таких двофракційних матеріалів.

Також здійснено розширення варіаційної постановки задачі про взаємодію тіл на випадок наявності адгезійного контакту. На цій основі досліджено контакт пружної сфери із гладкою та хвилястою поверхнями із напівпростором. Установлена наявність багатьох нестійких ділянок на кривій "сила – радіус плями контакту". Тому для визначення повних кривих застосовано метод прогнозування величини довантаження типу Arc-Length. Одержані чисельні розв'язки знаходяться у повній відповідності як із даними аналітичного, так і експериментального дослідження. Особлива увага приділена контактній взаємодії та напружено-деформованому стану кулькових поршнів та бігової доріжки гідропередачі трансмісії для важких гусеничних машин. Виявлені особливості, які полягають у зміні форми плями контакту при зростанні притискної сили, а також зміщенні максимуму контактного тиску із її центральної частини на периферійну. Також визначено, що податливість шорсткого шару позитивно впливає на рівень контактного тиску і компонент напружено-деформованого стану кулькових поршнів та статорних кілець із біговими доріжками. Крім того, досліджено напружено-деформований стан роликів, прес-форм та універсально-збірних пристосувань за наявності між їхніми елементами проміжного шару та при збуренні форми поверхонь контактуючих тіл.

Розділ 7 містить опис розрахунково-експериментальних досліджень. Мова йде про співставлення результатів чисельного моделювання процесів деформування нетканих матеріалів, матеріалів із суміші коротких та довгих волокон, контакту штампа із пружною хвилястою основою, а також про контактну взаємодію та напружено-деформований стан кулькового поршня гідропередачі із біговою доріжкою, напівматриць прес-форм, роликів. Отримана повна якісна та задовільна кількісна відповідність результатів досліджень.

У **додатках** міститься перелік публікацій за темою дисертації, акти і довідка про впровадження результатів, а також додаткові ілюстративні матеріали.

Висновки за роботою достатньо повні, розкривають суть отриманих результатів і моделей та їх переваги порівняно із відомими.

Окреслені області застосування результатів та шляхи подальшого розвитку досліджень за обраною тематикою.

Оцінюючи зміст роботи **в цілому**, необхідно зазначити, що вона сприймається як єдине, цілісне, завершене наукове дослідження, що містить вирішення актуальної наукової проблеми механіки деформівного твердого тіла, яка полягає у створенні теоретичних основ мікромеханіки деформування нових матеріалів мережевої просторово-волоконної структури та механіки контактної взаємодії пружних тіл із урахуванням мікромеханічних моделей шорсткості та інших проміжних або поверхневих шарів.

Дисертація та автореферат викладені українською мовою. Зміст автореферату повністю відображає основні положення дисертаційної роботи.

Зауваження до дисертаційної роботи

1. У Вступі є невдалі формулювання загального характеру. **Перший** приклад. На сторінці 9 написано: "... дотепер відсутня єдина завершена теорія мікромеханіки контактної взаємодії." Але філософія науки ґрунтується на тому,

що наука всемогутня, нескінченна та неосяжна, тому "єдиної завершеної теорії" не буде ніколи. **Другий** приклад. На тій же сторінці 9 написано: "... склалося протиріччя між потребами практики, з одного боку, і можливостями механіки деформівного твердого тіла, – з іншого.". Але насправді мова може бути не про обмежені "можливості", а про сучасний стан розвитку. **Третій** приклад. На сторінці 12 стверджується, що автором був розвинутий метод скінченних елементів (МСЕ). Оскільки МСЕ є методом апроксимації простору, часу та майбутнього розв'язку крайової задачі, то його розвиток може бути пов'язаний тільки з розвитком апроксимацій, а не з розвитком математичних моделей середовищ чи алгоритмів, які лише використовують МСЕ. **Четвертий** приклад. На сторінках 13 й 164 стверджується, що автором був модифікований метод Ньютона-Рафсона. Це теж помилкове твердження. Відомо, що цьому ітераційному методу біля 300 років, що він був узагальнений на функціональний простір Канторовичем у 1948 році, і невдовзі – на операторні рівняння, що не диференціюються. Є авторська лінеаризована модифікація. Всі необхідні теореми доказано. У механіці деформівного твердого тіла метод використовується для розв'язування вже сформованих систем нелінійних алгебраїчних рівнянь, які породжуються нелінійними крайовими задачами внаслідок їх дискретизації та алгебраїзації. Метод ніяк не пов'язаний із типами крайових задач, для розв'язування яких він застосовується. Аналогічно – про модифікацію методу послідовної верхньої релаксації (стор. 153);

2. "Перелік умовних позначень, скорочень і термінів" дисертації фактично містить тільки розшифровки аббревіатур. Це при тому, що є значна кількість тензорів, векторів та скалярних величин, які фігурують у наведених автором формулах. Як наслідок автором допускаються позначення різних об'єктів однаковими або дуже схожими символами. **Перший** приклад. У формулах (2.1) і (2.3) на стор. 67 та (2.5) на стор. 68, (3.15) на стор. 92 (і в інших) \mathbf{F} – це градієнт деформацій, а на стор. 68, 71 і 72 у тексті (і у подальшому), у формулі (3.101) \mathbf{F} – це навантаження, сила або спряжена сила. **Другий** приклад. На стор. 67 символ \mathbf{I} – історія навантаження, на стор.109 символ \mathbf{I} – тензор швидкості деформації, у формулі (3.15) $\mathbf{I}=\mathbf{F}\mathbf{F}^T$, а у значній кількості формул $\mathbf{1}$ – одиничний тензор. Є й інші подібні приклади;

3. Текст дисертації містить повтори та має завеликий об'єм;

4. Не наведено вичерпних постановок контактних крайових задач, які моделювалися в дисертації. Тому не завжди зрозумілі умови, в яких можна застосовувати запропоновані та розглянуті математичні моделі, а також отримати необхідні для розрахунків характеристики матеріалів та конструкцій. Зокрема, не ясно, чи можливе застосування запропонованих моделей контактної взаємодії при наявності тертя та проковзуванні з тертям, а також при контакті з коченням та/або із вертінням;

5. Багато фактажу, який не належить авторові дисертації і тому повинен знаходитися в "огляді", викладено поряд з авторськими здобутками, іноді без належних посилань. Це сприяє цілісності опису, але не сприяє швидкому усвідомленню авторської новизни розробки, змушує звертатися до першоджерел;

6. Рисунки, поміщені у таблиці 4.1, 5.2, 5.3, у розділі 6.1 та інші подібні, не завжди є виразними (розміри шрифтів, типи, кольори та товщини ліній, інше) та оригінальними (вочевидь сканувалися з паперових носіїв публікацій);

7. У тексті є граматичні та лінгвістичні помилки. Зокрема, не відредагований текст відразу під формулою (5.5).

Загальна оцінка дисертаційної роботи

Дисертаційна робота М. Ткачука відповідає паспорту спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла, а саме пункту "розробка моделей деформування матеріалів".

Наведені зауваження в основному характеризують оформлення дисертації, не зменшують її наукової та практичної ваги.

Автореферат у цілому відображує зміст дисертаційної роботи.

Дисертація є завершеною науковою дослідницькою роботою, в якій вирішена актуальна наукова проблема механіки деформівного твердого тіла, яка має важливе значення для сучасної промисловості.

Дисертаційна робота "Мікромеханічні моделі та методи осереднення властивостей матеріалів мережевої структури та проміжних шарів контактуючих тіл" виконана на світовому науковому рівні, відповідає сучасним вимогам, що ставляться до докторських дисертацій, та пп. 9, 10, 12 чинного "Порядку присудження наукових ступенів" щодо докторських дисертацій, а здобувач Микола Миколайович Ткачук продемонстрував високу кваліфікацію дослідника, здатність до постановок, формулювання та вирішення наукових проблем, володіння фізичним та математичним апаратом, чисельними та експериментальними методами досліджень вченого та глибокі професійні знання, тому він заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент,

професор кафедри "Динаміки і міцності машин та опору матеріалів"

Національного технічного університету України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

доктор технічних наук, професор

Костянтин РУДАКОВ

Підпис професора К.М. Рудакова засвідчую

Учений секретар КПІ ім. Ігоря Сікорського



Валерія ХОЛЯВКО