

Національна академія наук України
Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України

ТКАЧУК МИКОЛА МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 539.3

**МІКРОМЕХАНІЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ОСЕРЕДНЕННЯ
ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ МЕРЕЖЕВОЇ СТРУКТУРИ
ТА ПРОМІЖНИХ ШАРІВ КОНТАКТУЮЧИХ ТІЛ**

Спеціальність 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Львов Геннадій Іванович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри динаміки та міцності машин

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Рудаков Костянтин Миколайович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Кирилюк Віталій Семенович,
Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України,
провідний науковий співробітник відділу механіки
стохастично неоднорідних середовищ

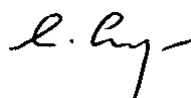
доктор технічних наук, доцент
Гребенюк Сергій Миколайович,
Запорізький національний університет,
завідувач кафедри фундаментальної математики

Захист відбудеться « 5 » березня 2020 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.180.01 в Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10.

Автореферат розісланий « 30 » січня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 64.180.01, д.т.н., проф.



О.О. Стрельнікова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Забезпечення конструкційної міцності елементів машин часто вимагає розробки нових моделей деформування матеріалу твердих тіл в об'ємі та умов контактного сполучення на границі з іншими тілами задля більш адекватного і точного розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) та обґрунтування прогресивних технічних рішень щодо виробів із високими технічними і тактико-технічними характеристиками (ТХіТТХ), що проектуються та виготовляються на підприємствах різних галузей. При цьому, серед інших, важливі такі обставини. Перша обставина диктується широким використанням і прогресуючою розробкою сучасних нетрадиційних матеріалів, в т.ч. – мережевої (волоконної) структури. Традиційні моделі не підходять для опису їх поведінки. Крім того, традиційний феноменологічний підхід у цьому випадку є недостатнім, тому що дає інформацію тільки для конкретного типу матеріалу в заданих умовах роботи і у скінченному діапазоні навантажень. У той же час перед механікою деформівного твердого тіла стоять у цьому розрізі більш широкі завдання: визначення тенденцій зміни фізико-механічних характеристик залежно, наприклад, від складу і будови ланцюжків волоконних фрагментів; створення композиційних матеріалів із заданими властивостями; пояснення часто неочевидних тенденцій у зміні фізико-механічних властивостей матеріалів при варіюванні хімічного складу, температури, технології виготовлення тощо.

Усі ці обставини висувають на перший план мікромеханічні підходи, які надають можливості розрахунку макрохарактеристик на основі розгляду поведінки мікроструктури матеріалу аж до моделей статистичної механіки волоконних ланцюжків. Натепер у світі цьому напрямку досліджень приділяється широка увага, зокрема, у відомих наукових школах університетів ФРН: Штутгарта – проф. К. Міє (С. Miehe), Нюрнберга – проф. П. Штайнман (P. Steinmann), Дортмунда – проф. А. Менцель (A. Menzel), Граца – проф. Г. Хольцапфель (G. Holzapfel); Франції (Париж) – проф. Ле Таллек (Le Tallec); США (Стенфорд) – проф. К. Ліндер (C. Linder).

Однак розроблені до теперішнього часу підходи дають результати, що не повною мірою відповідають експериментальним даним і даним практичної експлуатації. Це пов'язано зі складнощами математичного моделювання поведінки статистично представницьких наборів волоконних ланцюжків, макромолекул або ниток матеріалу у взаємодії одне з одним (наприклад, так званих нетканих матеріалів). Таким чином, розробка нових підходів та формування на їх основі нових нелінійних математичних моделей для більш адекватного опису фізико-механічних властивостей нетрадиційних матеріалів із мережевою структурою шляхом аналізу їх поведінки на рівні статистичної механіки наборів волоконних ланцюжків є актуальною науково-технічною проблемою.

Друга обставина зумовлена тим, що велика кількість машинобудівних конструкцій містить елементи, які знаходяться в умовах контактного силового та кінематичного сполучення. З метою зменшення контактної тиску в цих зонах конструктори прагнуть використовувати як спряжувані поверхні близької, а також частково, фрагментарно або майже співпадаючої (конгруентної) форми. Це, наприклад, модифікація робочих поверхонь зубів різних зубчастих передач, поверхонь роликотітників, бігових доріжок гідрооб'ємних передач (ГОП) тощо. Традиційні методи моделювання контактної взаємодії призводять у таких випадках або до значних похибок в одержуваних результатах, або до

надмірно громіздких чисельних моделей. Ще одним суттєвим чинником є недостатньо адекватне моделювання умов контактного сполучення на границях цих складнопрофільних тіл (СПТ). Найчастіше для цього записується, наприклад, умова непроникнення для гладких тіл у лінеаризованому вигляді. Як один із найбільш адекватних варіантів – урахування шорсткості, яка моделюється, наприклад, вінклеровим шаром, що дає дещо уточнені, але також лінеаризовані умови контактної взаємодії, які є умовами сумісності переміщень відповідних точок сполучених поверхонь.

У той же час сам поверхневий шар шорсткості (напилень, плівок, покриттів тощо) має у загальному випадку нелінійні властивості у залежності «тиск – переміщення». У результаті отримувані залежності «локальної» контактної жорсткості (податливості) від тиску, швидкостей, температури, режимів і технологій зміцнення тощо, що базуються на мікромеханічних моделях, стають істотно нелінійними. До теперішнього часу для формування цих залежностей залучаються або дані експериментальних досліджень, або різні спрощені моделі контактної взаємодії мікронерівностей у вигляді стрижнів, напівсфер тощо. У цьому випадку на основі одержуваних даних встановлюються різні моделі локальної податливості, які народжуються мікронерівностями поверхні (або іншими джерелами). Тут слід виділити, зокрема, роботи І.В. Крагельського, Н.Б. Дьомкіна, Персона (Persson BNJ), Грінвуда (Greenwood JA) та інших. У той же час дотепер відсутня єдина завершена теорія мікромеханіки контактної взаємодії. Однак відразу можна відмітити, що вже запропоновані до теперішнього часу нові моделі, які описують зв'язок «нормальні переміщення – контактний тиск», є істотно нелінійними, тобто такими, що не лінеарізуються без втрати фізичної адекватності, математичної коректності та чисельної точності.

Таким чином, у записі умов контактної взаємодії (непроникнення) з'являються нелінійні доданки, зумовлені нелінійністю фізико-механічних характеристик матеріалів шарів шорсткості, що принципово відрізняє їх від традиційних лінеаризованих. У результаті структурна нелінійність задачі доповнюється фізичною, причому друга присутня у співвідношеннях, які відображають суть першої. Для розв'язання таких задач, що містять нелінійні доданки в умовах контактної взаємодії, необхідне розроблення нових методів і підходів. Більш того, потрібне створення нових шляхів розв'язання обернених задач, тобто геометричного синтезу сприятливих за міцністю профілів поверхонь взаємодіючих тіл і фізико-механічних властивостей проміжних або поверхневих шарів. Ці обставини формують актуальну наукову проблему розроблення нових методів аналізу контактної взаємодії елементів машинобудівних конструкцій (ЕМБК) з урахуванням не тільки структурної, а й додаткової фізичної нелінійності, а також обернених задач синтезу (тобто обґрунтування геометричної форми поверхонь і властивостей поверхневих шарів матеріалів контактуючих тіл за критеріями міцності).

Вирішення всіх перерахованих проблемних питань повною мірою і в завершеному вигляді до теперішнього часу відсутнє. У свою чергу, потреби машинобудування у розробці методів розв'язання такого типу задач переоцінити складно, оскільки їх відсутність нівелює всі переваги, що досягаються при синтезі нових матеріалів, форм деталей і технологічних операцій обробки їхніх поверхонь. У результаті склалося протиріччя між потребами практики, з одного боку, і можливостями механіки деформівного твердого тіла, – з іншого. Розв'язання цього протиріччя передбачає вирішення актуальної науково-практичної проблеми, яка полягає у розробці та реалізації нових моделей деформування

і методів розв'язання фізично і структурно нелінійних задач визначення НДС СПТ.

Таким чином, сформульована комплексна актуальна наукова і важлива для промисловості проблема аналізу деформування нових мережевих матеріалів та забезпечення конструкційної міцності елементів машинобудівних конструкцій на основі розроблення нових моделей і методів аналізу їх нелінійної поведінки як в об'ємі, так і на поверхні твердих деформівних тіл в умовах контактної взаємодії із урахуванням мікромеханіки взаємодії волоконних ланцюжків, ниток в об'ємі матеріалу та мікронерівностей шорсткості або інших проміжних шарів на поверхні контактуючих тіл відповідно. Це становить напрямок дисертаційних досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась відповідно до тематичного плану НДР Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») «Удар» (№ д.р. 0100U001086т); «Розвиток теоретичних основ синтезу геометрії та моделювання втомної міцності нових зубчастих зачеплень» (№ д.р. 0110U001233); «Розробка спеціалізованих програмно-модельних комплексів для комп'ютерного моделювання контактної взаємодії та синтезу форми складнопрофільних тіл» (№ д.р. 0113U000420); «Розробка методів та моделей механіки контактної взаємодії складнопрофільних тіл методом граничних елементів» (№ д.р. 01150U000521), «Забезпечення високих технічних характеристик машин військового та цивільного призначення на основі дослідження міцності складнопрофільних деталей» (№ д.р. 0117U004880). У цих темах здобувач був виконавцем та керівником робочих груп за етапами досліджень. Крім того, здобувач був виконавцем договору ДЗ-55/2015 «Розроблення технології дискретного зміцнення для збільшення ресурсів елементів конструкцій військової та цивільної мобільної техніки» (№ д.р. 0115U006518), а також договорів про співпрацю між НТУ «ХПІ», з одного боку, і Державним підприємством «Завод ім. В.О. Малишева» (ДП «ЗіМ»), Державним підприємством «Харківське конструкторське бюро з машинобудування ім. О.О. Морозова» (ДП «ХКБМ»), Державним підприємством «Харківське конструкторське бюро з двигунобудування» (ДП «ХКБД»), Державним концерном «Укроборонпром», ПАТ «Азовмаш». Здобувач також є науковим керівником НДР (№ д.р. 0117U004970) «Підвищення характеристик виробів військового призначення шляхом аналізу та синтезу властивостей матеріалів на основі мікроструктурних моделей». Він був також виконавцем за господарчими договорами: «Розробка математичних і числових моделей динаміки і напружено-деформованого стану елементів вібротехніки та паливозаправників» (м. Маріуполь), № 12673 «Аналіз технічних характеристик елементів двигунів типу 6ТД і технологічних систем для виготовлення військових гусеничних і колісних машин» та № 12762 «Корпус» із ДП «ЗіМ». У звітах про виконанні договори містяться матеріали дисертаційних досліджень здобувача, а особисту участь підтверджено відповідними актами і довідковими матеріалами про впровадження.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення нових методів розрахунку напружено-деформованого стану шляхом створення і застосування у практиці розрахунків нелінійних моделей деформування матеріалу елементів конструкцій в об'ємі та на поверхні на основі мікромеханіки суцільного середовища.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані та вирішені наступні завдання досліджень.

1. Аналіз моделей деформування матеріалів та існуючих методів розрахунку на-

пружено-деформованого стану елементів конструкцій із урахуванням мікроструктури в об'ємі та на поверхні контактуючих тіл.

2. Постановка задач, обґрунтування підходів, методів, моделей та засобів дисертаційних досліджень.

3. Розроблення нових методів розрахунку і моделей для опису макромеханічних властивостей композиційних матеріалів типу полімерів, мережових волоконних і нетканих матеріалів на основі підходів статистичної мікромеханіки складних просторових структур одновимірних елементів.

4. Розроблення методів і моделей для аналізу контактної взаємодії СПТ із урахуванням мікромеханічних властивостей поверхневих і проміжних шарів матеріалів, що визначають їхню локальну контактну нелінійну податливість.

5. Аналіз впливу варіювання геометричної форми поверхонь взаємодіючих тіл і фізико-механічних властивостей матеріалів проміжних шарів на напружено-деформований стан елементів конструкцій.

6. Розв'язання прикладних задач аналізу процесів деформування, напружено-деформованого стану та контактної взаємодії елементів конструкцій.

7. Розрахунково-експериментальні дослідження елементів конструкцій із матеріалів із мережевою структурою та контактуючих тіл.

8. Упровадження результатів дисертаційної роботи у виробництво.

Об'єктом дослідження є процес деформування середовищ мережевої мікроструктури в об'ємі, а також контактуючих тіл із проміжними шарами на поверхнях, із урахуванням структурних і фізичних нелінійностей.

Предмет дослідження – нелінійні фізичні та математичні моделі деформування нових матеріалів на основі мікромеханіки мережових структур на рівні статистичних наборів їх ланцюжків, нелінійні моделі контактної взаємодії на базі інтеграції моделей мікромеханіки контактної взаємодії поверхневих шарів матеріалів, методи розв'язання нелінійних прямих і обернених задач контактної взаємодії та обґрунтування геометричної форми складнопрофільних гладких і шорстких тіл, а також закономірності зміни напружено-деформованого стану конструкцій при варіюванні геометричних параметрів і фізико-механічних характеристик матеріалів.

Методи дослідження. Для вирішення поставленої наукової проблеми використовувалися методи механіки суцільного середовища, зокрема, для формування рівнянь стану. Для виведення нелінійних рівнянь, що описують фізико-механічні властивості полімерних і волоконних матеріалів, залучалися і вдосконалювалися співвідношення мікромеханіки просторових ланцюжків, які перебувають у взаємодії. Перехід до макромеханічних формулювань здійснювався на основі розроблених нових методів просторової гомогенізації властивостей матеріалів. При формуванні розв'язувальних рівнянь аналізу контактної взаємодії ЕМБК були використані загальні співвідношення механіки контактної взаємодії, теорії варіаційних нерівностей (ТВН), варіаційного принципу Калькера і методу граничних інтегральних рівнянь (МГІР). Локальні властивості податливості внаслідок шорсткості поверхонь контактуючих тіл або наявності проміжних шарів враховувалися за допомогою різних моделей контактування мікронерівностей відповідно до механіки контактної взаємодії. Дискретизація розв'язувальних співвідношень для аналізу НДС досліджуваних тіл здійснювалася на основі розвитку методу скінченних елементів

(МСЕ) і методу граничних елементів (МГЕ). Для розв'язання побудованої системи співвідношень були залучені методи чисельного розв'язання нелінійних рівнянь, у т.ч. розроблені методи додаткових зазорів і змінних параметрів податливості як частинні варіанти таких методів, які мають природне трактування. Також із цією метою залучалися та модифікувалися методи Ньютона-Рафсона та релаксаційні процедури. Експериментальні дослідження здійснювалися з використанням методу контактних відбитків, орієнтованого на технологію із застосуванням чутливих до контактного тиску плівок, а також електротензометрії та голографічної інтерферометрії. Крім того, залучалися результати експериментальних досліджень деформування волоконних, нетканих та м'яких матеріалів, які одержані за допомогою комплексів лабораторного обладнання. Комплекс чисельних досліджень здійснювався у середовищі програмних пакетів ANSYS, Matlab, Maple та SolidWorks. Із їх використанням створювалися комп'ютерні моделі, а також оригінальний програмний код, який реалізує розроблені математичні моделі. Ліцензійне забезпечення цих програмних продуктів підтримується НТУ «ХП», університетами Штутгарта (Німеччина), Барі (Італія) і Стенфордським університетом (США), у яких свого часу здобувач був або штатним співробітником (докторантом), або стажувався.

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 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 мережевої структури одновимірних фрагментів. Порівняно із традиційними створені моделі більш адекватно описують особливості деформування матеріалів у вигляді просторових хаотичних та упорядкованих мережевих 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 непроникнення тіл одне в одне. 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 т.з. 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 дис-

кретизації задачі із залученням апроксимацій шуканого розподілу контактного тиску на мережі граничних елементів. Відповідно, різко знижується розмірність дискретної моделі порівняно, наприклад, із застосуванням МСЕ. При цьому досягається значне підвищення оперативності розв'язання задач аналізу контактної взаємодії складнопрофільних тіл при збереженні 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, але 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 противагу 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 встановлювати вміст різних складових, який призводить до реалізації заданих результуючих властивостей матеріалу-суміші.

7. *Уперше* розроблено методи розв'язання задач мікромеханіки волоконних, нетканних 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 одновимірними елементами. 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 вибору їх складу та мікроструктури.

Підсумково означені компоненти наукової новизни формують два нових наукових напрямки: *мікромеханіка деформування нетрадиційних матеріалів у вигляді мережевих структур одновимірних елементів із ентальпійною та ентропійною природою поведінки; структурно-фізично нелінійні задачі аналізу контактної взаємодії пружних тіл за наявності проміжного нелінійного шару.* Обидва заявлені напрямки об'єднані, з одного боку, природою зв'язку властивостей досліджуваних систем пружних тіл на мікро- та макрорівні, а з іншого, – слабкими варіаційними формулюваннями та зведенням до проблем пошуку умовних екстремумів функціоналів додаткової енергії на множинах силових чинників, які задовольняють умовам типу нерівностей.

Достовірність і точність результатів, отриманих у дисертаційній роботі, базується на використанні строгого математичного апарату математики і механіки, забезпечується шляхом поетапної перевірки відповідності моделей, що будуються, основним фізичним законам і підтверджується в ході комплексу розрахунково-експериментальних досліджень, а також на основі позитивних результатів багаторічної експлуатації машинобудівних конструкцій, спроектованих і експлуатованих із використанням розроблених рекомендацій.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні ефективних засобів розв'язання задач забезпечення конструкційної міцності для реальних машинобудівних конструкцій. Розроблені засоби відрізняються від відомих більш високим ступенем адекватності створених моделей, точністю одержуваних результатів і достовірністю рекомендацій, що надаються. У кінцевому підсумку, як реалізація теоретичних розробок, створено комплекс чисельних моделей та програмних модулів, що має можливість адаптації до дослідження різних об'єктів, оперативність та можливість спряження із системами автоматизованого проектування. Це робить його затребуваним на етапах проектування, технологічної підготовки виробництва і оптимізації параметрів нових конструкцій із метою забезпечення більш високих ТХіТТХ.

Крім того, з точки зору значущості для машинобудування, із використанням результатів дисертаційних досліджень одержані засоби та рекомендації, що мають безпосереднє застосування в таких напрямках: створення основи для забезпечення макромеханічних властивостей матеріалів на основі математичного моделювання мікронаборів макромолекул, волоконних ланцюжків і ниткових мереж, що надає можливості прогнозування властивостей не тільки існуючих, але й ще тільки створюваних матеріалів; розроблення бази для конструювання нових мережевих матеріалів із заданими фізико-механічними властивостями; більш адекватне моделювання розподілу контактної тиску у сполученнях складнопрофільних деталей; обґрунтування геометричної форми поверхонь контактуючих тіл за міцнісними критеріями, а також створення основи для аналізу і призначення режимів обробки та формування поверхневих шарів, що забезпечують необхідні трибомеханічні їх властивості.

Упровадження результатів дисертаційної роботи дає можливість забезпечувати необхідний рівень технічних характеристик продукції вітчизняного машинобудування, підвищувати конкурентоспроможність виготовлених виробів на світовому ринку та ско-

рочувати терміни проектних досліджень. Результати роботи впроваджені, зокрема, на ДП «ЗіМ», ДП «ХКБМ», ДП «ХКБД» (усі – м. Харків), ПАТ «Азовмаш», ПрАТ «АзовЕлектроСталь», науково-інженерному центрі керуючої компанії «Рейлтрансхолдінг» (усі – м. Маріуполь), а також у наукових дослідженнях НТУ «ХПІ». Від цих організацій одержані відповідні довідка та акти впровадження, які додані до дисертаційної роботи. В аспекті конкретного застосування результати дисертаційної роботи використані при розробці функціональних, захисних та силових елементів машин військового та цивільного призначення, зокрема, при розробці нових та модернізації існуючих багатовісних транспортних засобів спеціального призначення, гідропередач для перспективних трансмісій важких військових машин, елементів технологічних систем (верстатні пристосування, пресформи), зубчастих передач тощо. За рахунок обґрунтування раціональних проектно-технологічних параметрів цих об'єктів із використанням результатів дисертаційних досліджень забезпечуються їх високі ТХіТТХ, скорочуються терміни та знижується вартість проектних досліджень. Сумарний економічний ефект при цьому складає 2,2 млн. грн.

Особистий внесок здобувача в роботи, виконані у співавторстві, полягає у наступному: у монографії [2] здобувачем розроблені базові підходи до формування та вирішення розв'язувальних співвідношень для аналізу контактної взаємодії пружних тіл; у статтях [3–9] автором запропоновано загальні підходи до вирішення поставлених завдань, розроблені чисельні моделі, отримані і проаналізовані результати досліджень; у статтях [10–17] здобувач розробив розв'язувальні співвідношення для аналізу контактної взаємодії СПТ; статті [18, 20, 22, 24–26, 31] містять авторськи розробки із аналізу НДС, контактної взаємодії та синтезу геометричної форми, а також опис здійснених досліджень; статті [19, 21, 23, 27–29] містять розробки здобувача стосовно критеріїв для визначення розподілу сили контактної взаємодії пружних тіл; статті [30, 32–34] містять опис розробок здобувача зі створення розв'язувальних співвідношень МГЕ; у статтях [35–54] викладені результати дослідження контактної взаємодії ЕМБК; тези та матеріали конференцій [56–63, 66, 83, 99, 102, 108] містять опис моделей, запропонованих здобувачем для моделювання мікромеханічних моделей матеріалів мережевої структури; тези [64, 65, 68, 76, 100] описують критерії визначення сили ударної взаємодії пружних тіл; тези та матеріали конференцій [67, 70–75, 77–82, 84–98, 101, 103–107] описують результати дослідження контактної взаємодії та міцності ЕМБК.

Роботи [1, 5, 20, 46, 51, 55, 69, 83] написані без співавторів.

Усі основні результати, викладені в дисертації, належать здобувачу, а саме: розроблення нових підходів до постановки задач і методів їх розв'язання, створення нових і вдосконалення існуючих математичних моделей, побудова дискретизованих розв'язувальних співвідношень і розробка методів їх розв'язання та комплексу параметричних моделей та програмних модулів, розв'язання за їх допомогою тестових і прикладних задач, створення експериментального стенду, розроблення методики і здійснення експериментальних досліджень НДС тестових конструкцій, аналіз та узагальнення результатів.

Апробація матеріалів дисертації. Окремі фрагменти дисертаційної роботи доповідалися на міжнародних науково-технічних (МНТК) і міжнародних науково-практичних (МНПК) конференціях: OxMOS. Joint Workshop on Atomistic Models of Solids University of Oxford (UK, 2009); МНПК «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2010–2019); 4th GAMM Seminar Multiscale Material

Modelling, Ruhr-Universität Bochum (2010, Germany); 10th GAMM Seminar on Microstructures, TU Darmstadt (2011, Germany); міжнародних симпозіумах українських інженерів-механіків (Львів, 2011–2019); GAMM 2011. 82nd Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics, TU Graz (2011, Austria); GAMM 2012. 83rd annual meeting of the international association of applied mathematics and mechanics, TU Darmstadt (2012, Germany); МНТК «Проблеми якості і довговічності зубчастих передач, редукторів, їх деталей і вузлів» (Севастополь, 2011–2013), (Одеса, 2014–2019); ICMM2. 2nd International conference on material modelling (2011, Paris, France); COMPLAS XI. International conference on computational plasticity (Barcelona, 2011, Spain); 11th GAMM seminar on microstructures, University of Duisburg-Essen (2012, Germany); ESMC 2012. 8th EUROMECH Solids Mechanics Conference. TU Graz (2012, Austria); ECCOMAS 2012. European congress on computational methods in applied sciences and engineering, TU Vienna (2012, Austria); PACAM XIII. The Pan American congress of applied mechanics (Houston, USA, 2013); МНТК «Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ» (Львів, 2014–2019); WCCM XI. 11th. World Congress on Computational Mechanics (Barcelona, Spain, 2014); МНТК «Вібрації в техніці та технологіях» (Львів, 2014, 2015, 2018); МНТК «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення та експлуатації машинобудівних конструкцій» (Львів, 2014, 2016, 2018); конференції «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки» (Київ, 2014–2018); інформаційно-комунікативному заході «Перспективи науково-технологічного забезпечення оборонно-промислового комплексу України» (Київ, 2015); МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обробки тиском в машинобудуванні та металургії» (Харків, 2015, 2016, 2018); ICMD 2015. 56th International Conference of Machine Design Departments (Братислава, Словачька Республіка, 2015); інформаційно-комунікативному заході «Наука: безпека країни та розвиток військово-промислового комплексу» (Київ, 2016); VII НПК «Наукове забезпечення службово-бойової діяльності Національної Гвардії України» (Харків, 2016, 2017); 5th International Conference «Nonlinear Dynamics – 2016» (Харків, 2016); Всеукраїнській НТК «Механіка машин – основна складова прикладної механіки» (Дніпро, 2017); XVIII Міжнародному симпозіумі «Методи дискретних особливостей в задачах математичної фізики» (Харків, 2017); МНПК «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки» (Київ, 2017–2019); 7th GACM Colloquium on Computational Mechanics for Young Scientists from Academia and Industry (Stuttgart, Germany, 2017); XVIII НТК «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» (Чернігів, 2018); міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми механіки та математики, присвяченої 90-річчю від дня народження академіка Я. С. Підстригача та 40-річчю створеного ним Інституту прикладних проблем механіки і математики НАН України» (Львів, 2018).

У повному обсязі робота була апробована і схвалена на семінарі кафедр «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин» і «Динаміка та міцність машин» НТУ «ХП» (Харків, 2019), а також на науково-технічній проблемній раді Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України (Харків, 2019), семінарах в НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського» (Київ, 2019), Інституті прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України

(Львів, 2019) та Інституті механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України (Київ, 2019).

Публікації. Основні наукові положення і результати досліджень за темою дисертаційної роботи опубліковано у 108-ми наукових працях [1–108], серед яких 2 монографії [1, 2], 53 статті у фахових виданнях за переліком МОН України [3–55] (6 із них – статті у виданнях, що індексуються науково-метричною базою SCOPUS [3–8]) та 53 тези та матеріали конференцій, у тому числі – й міжнародних [56–108].

Структура та обсяг роботи. 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У **першому** розділі описано аналіз існуючих методів, моделей та засобів дослідження деформування нетрадиційних мережевих (волоконних) матеріалів та контактної взаємодії складнопрофільних тіл із нелінійним проміжним шаром. Зокрема, здійснено аналіз проблеми побудови удосконалених моделей матеріалів зі складною мікроструктурою, що застосовуються для забезпечення високих характеристик проектованої техніки. Із цього напрямку визначені роботи вчених відомих наукових шкіл: S. Govindjee, S. Göktepe, G. Holzapfel, E. P. Janmey, Kuhl, C. Linder, Ja. Llorca, F. C. MacKintosh, A. Menzel, C. Miehe, R. Ogden, Catalin R. Picu, M. Silberstein, P. Steinmann, Le Tallec, E. Verron, М.І. Бобиря, С.М. Гребенюка, О.М. Гузя, В. С. Кирилюка, К. М. Рудакова, Л.П. Хорошуна. На їх основі поставлені пріоритетні задачі із удосконалення існуючих підходів та створення нових методів осереднення випадкової будови тіл та поверхневих шарів. Також проаналізовані методи та моделі дослідження контактної взаємодії елементів конструкцій, описані у роботах вчених К. В. Аврамова, В.А. Александрова, В.О. Бабешка, М.І. Бобиря, Ю.С. Воробйова, І.І. Воровича, Л.О. Галіна, П.П. Гонтаровського, І.Г. Горячевої, С. М. Гребенюка, В. Б. Гриньова, О.М. Гузя, Б.П. Зайцева, Б.Я. Кантора, А.С. Кравчука, В. С. Кирилюка, Л.В. Курпи, В. І. Куща, Г.І. Львова, Р.М. Мартиняка, З.Л. Мартирисяна, В.В. Михаськіва, В.І. Моссаковського, М.І. Мухелішвілі, В.В. Панасюка, В.З. Партон, П.І. Перліна, А.М. Підгорного, Д. А. Пожарського, Г.Я. Попова, В.С. Проценка, В.Л. Рвачова, Б.Л. Ромаліса, К. М. Рудакова, О.О. Стрельнікової, М.І. Теплового, А.Ф. Улітки, Я.С. Уфлянда, А. П. Філіппова, М.І. Чебакова, І.Я. Штаєрмана, J.R. Barber, D.B. Bogy, M. Ciavarella, J.A. Greenwood, H. Hertz, K. L. Johnson, J.J. Kalker, M. Paggi, L. Pastewka, BNJ Persson, M. Robbins, A. Signorini, D.A. Spence, B.I. Wohlmuth, P. Wriggers, G. Zavarise та багатьох інших. При цьому визначені аспекти, які потребують розробки нових моделей та методів досліджень. У підсумку виділені два напрямки, поєднані, проте, єдиним підходом, схожими фізичними моделями, подібними математичними постановками та чисельними методами дослідження. Це, з одного боку, – проблема визначення закономірностей деформування нових нетрадиційних мережевих матеріалів, з

іншого боку, – це визначення впливу фізично нелінійних властивостей матеріалу проміжних шарів на конструкційну міцність складнопрофільних ЕМБК. Вони мають подібні фізичні закономірності на мікрорівні та потребують розробки моделей, що поєднують мікро- та макромасштабні підмоделі у єдиній мікромасштабній моделі. Крім того, одним із найбільш пріоритетних спільних напрямків досліджень є перехід до варіаційних постановок, розроблення методів дискретизації та методів розв'язання одержуваних співвідношень.

У розділі 2 розроблені загальні підходи до вирішення поставлених проблем механіки мережевих матеріалів та контактної взаємодії складнопрофільних тіл.

Базовими питаннями при дослідженні деформування матеріалів у вигляді мережевих структур одновимірних елементів є, по-перше, побудова визначальних рівнянь на мікрорівні; по-друге, – це розробка моделей осереднення мікрохарактеристик; по-третє, – це перехід до макрохарактеристик. Усі ці етапи здійснюються на базі нових авторських моделей та варіаційних формулювань.

Для статичного відгуку мережевих мікроструктур може бути записане варіаційне формулювання або у формі мінімізації прирощень повної внутрішньої енергії як функції змінної деформації ланок мережі, або у формі мінімізації додаткової енергії як функції осевих сил. У першому випадку отримуємо нестрогий опуклий функціонал з областю невизначеності екстремуму (типу представленого на рис. 1, а), у другому – недиференційований функціонал (див. рис. 1, б). І у першому, і у другому випадках отримуємо проблеми пошуку однозначного розв'язку.

Описані постановки, кожна окремо, а тим більше – в їх послідовному поєднанні, відрізняються від традиційних: по-перше, вони орієнтовані не на регулярні повторювані структури, а на деякий стохастичний розподіл волокон і вузлів; по-друге, у вузлах взаємодії волокон передбачена не тільки можливість злиття (нерухомого з'єднання), а й проковування волокон одне відносно іншого; по-третє, враховується тертя у сполученні волокон, а, отже, враховується історія навантаження, що змушує здійснювати розв'язання задачі у прирощеннях.

Для дослідження НДС відповідальних ЕМБК представлені нові методи і моделі аналізу контактної взаємодії СПТ із нелінійно пружним шаром, що їх розділяє. При цьому можна виділити два випадки: контакт тіл неузгодженої та узгодженої форм. У першому випадку розподіл початкового зазору між тілами подається у вигляді квадратичної форми координат (або іншої ненульової функції) у площині, дотичній до точки геометричного контакту тіл (у багатьох випадках може бути застосована модель Герца). У другому випадку має місце збіг (конгруентність) деяких частин поверхонь контактуючих тіл. У той же час прагнення до поліпшення функціональних властивостей вузлів ЕМБК визначає тенденцію проектування деталей з близькими, але не співпадаючими поверхнями. У цьому випадку не застосовні ні модель Герца, ні Штаєрмана, ні інші моделі. Більш того, не завжди контактуючі поверхні можуть бути описані аналітично. Таким чином, на додаток до традиційної класифікації, можна ввести третій тип контактуючих СПТ. Він характерний тим, що локалізація контакту у номінальному вихідному стані або лінійна, або точкова. При цьому величини зазорів, пружних переміщень, зближень за рахунок обтискання проміжних шарів – сумірні. А, значить, незастосовні моделі і методи, що працюють



Рис. 1. Вигляд функціоналів:
а – повна внутрішня енергія;
б – додаткова енергія

для двох перших випадків. Цим і визначається досліджуваний у роботі випадок контакту тіл, названих складнопрофільними. Одержується у загальному випадку нелінійна система рівнянь і нерівностей, відмінною рисою якої є наявність нелінійних доданків в умовах сумісності переміщень. У результаті отримуємо зв'язані нелінійні умови контактної взаємодії, які у роботі названі структурно-фізичною нелінійністю.

Для розв'язання такого типу задач у роботі пропонується новий підхід із модифікацією варіаційного принципу Калькера. Він формується щодо шуканого контактного тиску на поверхні, тобто фізична розмірність задачі знижується на одиницю. У підсумку, розширивши відоме формулювання принципу Калькера, отримуємо задачу мінімізації функціонала додаткової енергії. Цей опуклий функціонал складається з суми лінійної, квадратичної форми тиску і нелінійної частини, що відповідає нелінійно-пружному шару.

Отримання розв'язувальних рівнянь є тільки початковою частиною поставленої у роботі проблеми. Найважливішим же компонентом є розробка методів розв'язання цієї системи співвідношень, принциповою відмінністю якої від, наприклад, традиційної системи нелінійних рівнянь, є те, що невідомими є не тільки шукані вузлові змінні, але і склад їх множини, оскільки шуканою є також і область контакту. Сформульовані фізично-структурно нелінійні співвідношення та розроблені методи їх розв'язання служать також основою для розробки методів розв'язання обернених задач.

Описані у розд. 2 базові підходи є основою досліджень, наведених у розд. 3–7.

У **розділі 3** досліджуються матеріали, що мають на мікроскопічному рівні мережеву структуру і є порівняно новими з точки зору створення та використання на практиці. Такі структури утворені, наприклад, великою кількістю волокон, пов'язаних між собою у точках з'єднання. Оскільки один із розмірів волокон домінує над іншими, вони по суті є одновимірними об'єктами, зануреними у тривимірний простір (рис. 2). У цьому полягає їх істотна відмінність від інших неоднорідних структур, в яких присутні тривимірні компоненти або ж безрозмірні об'єкти. Без втрати загальності можна вважати, що у початковій конфігурації усі волокна мають одиничне розтягнення $|\lambda_0| = 1$, де початковий вектор розтягнення $\lambda_0 = \mathbf{R}_0 / R_0$ є вектором $\mathbf{R}_0$, що з'єднує кінці волокна, віднесений до його абсолютної довжини R_0 . Кожну точку на одиничній сфері S_0 (мікросфера) асоційовано із множиною всіх волокон із певною орієнтацією λ_0 (див. рис. 2). Деформація сітки у

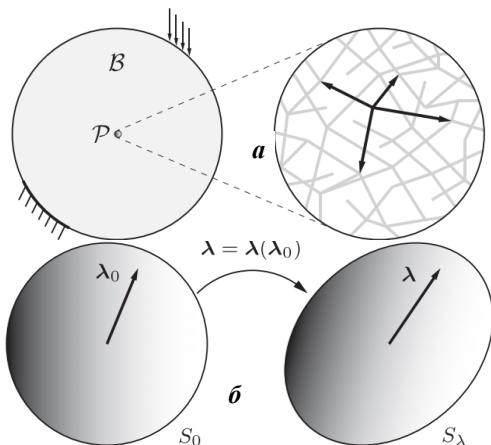


Рис. 2. Випадкова мережева будова твердого тіла у матеріальній точці (а) та її статистичне подання на мікросфері репрезентативних початкових орієнтацій (б)

рамках запропонованого формалізму описується векторною функцією $\lambda(\lambda_0)$. Її значенням є вектор мікророзтягнення $\lambda = \mathbf{R} / R_0$, де $\mathbf{R}$ з'єднує кінці деформованих волокон із початковою орієнтацією λ_0 . Ця функція відображає мікросферу S_0 в $\mathbb{R}^3$ на поверхню розтягнення S_λ відповідно до виразу $\lambda(\lambda_0): \lambda_0 \in S_0 \rightarrow \lambda \in S_\lambda \subset \mathbb{R}^3$. Пропонований статистичний опис містить найбільш важливу інформацію про мережу та її деформації, яка визначається векторною величиною розтягнення волокон (на відміну від традиційних скалярних).

Для складання кінематичних рівнянь зв'язку

мікродеформацій волокон із макроскопічними деформаціями суцільного тіла розглядаються мережеві шляхи, що вводяться за аналогією із теорією графів. Пропонується розглянути спеціальні шляхи, які у кожній точці з'єднання продовжуються уздовж волокна з максимальним просуванням у певному напрямку, названі *шляхами максимального просування*. Ці шляхи визначаються у початковому недеформованому стані сітки, в якому всі волокна мають одиничне розтягнення і рівномірно орієнтовані у всіх напрямках. Розглянемо довільний напрямок шляху, який визначається одиничним вектором $\mathbf{l}_0$ з $|\mathbf{l}_0| = 1$; просування у цьому напрямку уздовж волокна з орієнтацією $\lambda_0 - \xi = \lambda_0 \cdot \mathbf{l}_0$. Для ізотропної мережі розподіл цієї величини є однорідним на інтервалі $[-1, 1]$. Розглянемо тепер вузол сітки, що належить шляху максимального просування (рис. 3, а). У цьому вузлі з'єднано f волокон із початковими орієнтаціями $(\lambda_0^i)_{i=1}^f$, де f – функціональність мережі. За умови, що шлях прийшов до цього з'єднання вздовж одного з волокон λ_0^f , залишається $(f-1)$ волокно, уздовж яких його можна продовжити далі. Просування у напрямку $\mathbf{l}_0$ уздовж цих волокон визначається $f-1$ випадковими величинами $\xi^i = \lambda_0^i \cdot \mathbf{l}_0$, кожна з яких має розподіл $F_\xi(x) = P(\xi = \lambda_0 \cdot \mathbf{l}_0 \leq x) = (1/|S_0|) \int_{S_{0,x}} d\lambda_0 = (x+1)/2$.

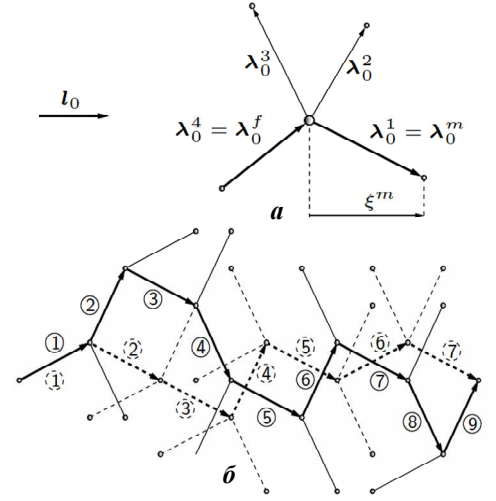


Рис. 3. Шлях максимального просування в мережі: а – точка з'єднання на шляху і волокно з максимальним просуванням ξ^m в напрямку $\mathbf{l}_0$; б – порівняння шляхів на прикладі двох мереж із функціональністю $f = 3$ (суцільні лінії) і $f = 4$ (додаткові сегменти нанесені пунктирними лініями)

Максимальне просування від цього вузла в напрямку $\mathbf{l}_0$ в підсумку становить $\xi^m = \max \{\xi^i\}_{i=1}^{f-1}$. Орієнтація волокна з максимальним просуванням

$\lambda_0^m = \arg \max \{\lambda_0 \cdot \mathbf{l}_0, \lambda_0 \in \{\lambda_0^i\}_{i=1}^{f-1}\}$ є випадковою із розподілом

$$p^m(\lambda_0, \mathbf{l}_0) = (f-1)((\lambda_0 \cdot \mathbf{l}_0 + 1)/2)^{f-2} \quad (1)$$

на мікросфері S_0 . Якщо тепер розглянути довгий шлях максимального просування з n_{l_0} волокон повністю, де n_{l_0} – велике, то вектор, що поєднує його початок та кінець, визначається середнім значенням $\mathbf{R}_{l_0} = n_{l_0} \langle \mathbf{R}_0 \lambda_0^m \rangle = n_{l_0} \mathbf{R}_0 [(f-2)/f] \mathbf{l}_0$ за усіма сегментами, представленими на мікросфері. Відповідно, його деформація як макроскопічного лінійного об'єкта обчислюється за афінним перетворенням градієнта деформації: $\mathbf{R}_l = \mathbf{F} \mathbf{R}_{l_0} = n_{l_0} \mathbf{R}_0 [(f-2)/f] \mathbf{l}$, де $\mathbf{l} = \mathbf{F} \mathbf{l}_0$. З іншого боку, цей деформований шлях складається з розтягнутих волокон $\lambda^m = \lambda(\lambda_0^m)$ і альтернативно $\mathbf{R}_l$ знаходиться шляхом осереднення $\mathbf{R}_l = n_{l_0} \langle \mathbf{R}_0 \lambda^m \rangle$. Зіставляючи останні вирази, отримуємо співвідношення

$$\langle \lambda^m \rangle = [(f-2)/f] \mathbf{l} \sim (1/|S_0|) \int_{S_0} \lambda(\lambda_0) p^m(\lambda_0, \mathbf{l}_0) d\lambda_0 = [(f-2)/f] \mathbf{F} \cdot \mathbf{l}_0, \quad (2)$$

яке накладає множину обмежень, що відповідає всім можливим напрямкам $\mathbf{l}_0 \in S_0$, на невідомий розподіл $\lambda(\lambda_0)$ мікродеформацій волокон у мережі. У математичному відношенні воно є інтегральним рівнянням Фредгольма I роду на мікросфері. Ці співвідношення

називатимемо умовами деформації максимальних шляхів. У випадку тетрафункціональних мереж із $f = 4$ вони набувають тензорного виразу $(1/|S_0|) \int_{S_0} \lambda(\lambda_0) \otimes \lambda_0 |d\lambda_0| = (1/3)\mathbf{F}$,

який природно інтерпретується як співвідношення між осередненою мірою мікродеформації волокон мережі та локальною макроскопічною деформацією, представленою $\mathbf{F}$.

Для того, щоб визначити дійсні мікродеформації мережі, у цій роботі використовується принцип мінімуму вільної енергії: з усіх кінематично можливих мікродеформацій волокон вони набудуть саме такої, що мінімізує повну енергію мережі. Оскільки повна енергія мережі Ψ_{net} складається з енергії розтягування окремих волокон $\psi_f(|\lambda|)$, то її можна визначити осередненням $\Psi_{\text{net}}[\lambda] = n \langle \psi_f(|\lambda|) \rangle$ за репрезентативними напрямками відповідно до статистичного подання. Тут n – вихідна щільність мережі. З урахуванням цього виразу варіаційне формулювання може бути точніше визначене як принцип мінімуму осередненої енергії:

$$\begin{cases} \Psi_{\text{net}}[\lambda] \sim \langle \psi_f \rangle = (1/|S_0|) \int_{S_0} \psi_f(|\lambda(\lambda_0)|) |d\lambda_0| \xrightarrow{\lambda(\lambda_0)} \min; \\ \langle \lambda \otimes \lambda_0 \rangle = (1/|S_0|) \int_{S_0} \lambda(\lambda_0) \otimes \lambda_0 |d\lambda_0| = (1/3)\mathbf{F}. \end{cases} \quad (3)$$

Відповідно до нього рівноважні мікродеформації волокон λ^* характеризуються афінним розподілом сил $\mathbf{f}_f^*(\lambda^*) = \mathbf{v}\lambda_0$, де $\mathbf{v}$ – тензор другого порядку множників Лагранжа. За цими силами згідно стандартних міркувань термодинаміки визначається осереднений макроскопічний відгук матеріалу до макроскопічної деформації. А саме, для першого тензору Піюлі-Кірхгофа напружень одержано такий вираз:

$$\mathbf{P} = \partial_{\mathbf{F}} \Psi_{\text{net}}^*[\mathbf{F}] = n \langle \partial_{\mathbf{F}} \psi_f(|\lambda^*|) \rangle = (n/|S_0|) \int_{S_0} \mathbf{f}_f^* \frac{\partial \lambda^*}{\partial \mathbf{F}} |d\lambda_0|, \quad (4)$$

або $\mathbf{P} = n \langle (\mathbf{v}\lambda_0) \otimes \lambda_0 \rangle = (1/3) \cdot n\mathbf{v}$. Запропонована модель MAPC (maximal advance path constraint) реалізована чисельно, що уможливило її подальше використання у МСЕ.

Мікромеханічна модель в'язкопружності еластомерів. Відповідно до подання про поділ структури матеріалу на пружну базову полімерну сітку і в'язку мобільну підмережу (див. рис. 2), ізохорна частина вільної енергії – $\bar{\Psi} = \bar{\Psi}^e(\bar{\mathbf{F}}) + \bar{\Psi}^v(\mathbf{I}, \bar{\mathbf{F}})$, де $\bar{\Psi}^e(\bar{\mathbf{F}})$ – енергія пружних деформацій, а $\bar{\Psi}^v$ – в'язка енергія, що залежить від історії навантаження. Аналогічним чином

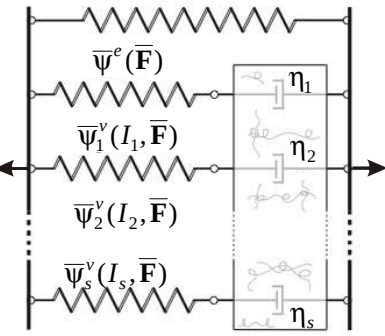


Рис. 4. Максвеллівська реологічна модель ізохорної реакції матеріалу

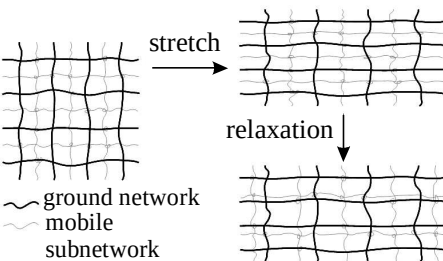


Рис. 5. Механізм релаксації незшитих полімерних ланок

розкладаються і напруження $\bar{\tau} = \bar{\tau}^e + \bar{\tau}^v(\mathbf{I})$ на пружні $\bar{\tau}^e(\bar{\mathbf{F}}) = 2\partial_{\mathbf{g}} \bar{\Psi}(\bar{\mathbf{F}})$ і непружні $\bar{\tau}^v(\mathbf{I}, \bar{\mathbf{F}}) = 2\partial_{\mathbf{g}} \bar{\Psi}(\mathbf{I}, \bar{\mathbf{F}})$. Таке розкладання подається у вигляді реологічної моделі максвеллівського типу (рис. 4, модель складається з однієї пружної гілки, що представляє основну зшиту частину полімерної сітки, наведену на рис. 5, а також з в'язких гілок, кожна з яких відповідає окремій мобільній

підмережі рис. 5). Відштовхуючись від рівняння Смолуховського для броунівського руху частинок, для броунівського руху гнучких полімерних ланцюгів (рис. 6, полімерний ланцюг із подовженням $\mathbf{r}$ моделюється як ентропійна пружина, яка поміщена в середовище, що деформується, в'язка взаємодія ланцюжка з іншими зосереджена на її кінцях) одержано еволюційне рівняння для щільності станів $p(\lambda, t)$

$$\partial_t p(\lambda, t) = -\text{div}_\lambda [p(\lambda, t) \langle \dot{\lambda} \rangle] = -\text{div}_\lambda [\mathbf{h}_{rev} + \mathbf{h}_{dis}], \quad (5)$$

в якому зворотня складова зміни стану $\mathbf{h}_{rev}$ відповідає руху кінчиків ланцюжків разом із макроскопічним середовищем, що визначається тензором швидкості деформації $\mathbf{I} = \dot{\mathbf{F}}\mathbf{F}^{-1}$, а незворотня частина $\mathbf{h}_{dis}$ - броунівському руху, що визначається градієнтом хімічного потенціалу $U_{ch}(\lambda, t) = k_B \theta \ln p(\lambda, t) + 1,5 k_B \theta \lambda^2$ та ефективною в'язкістю середовища D^λ . Видається можливим подати загальний розв'язок рівняння (5) як афінне перетворення $\Lambda \rightarrow \lambda = \mathbf{P}\Lambda$ початкового ізотропного гаусового розподілу подовжень ланцюжків. Відповідно виявляється можливим записати рівняння зміни мікродеформації мобільних мереж $\dot{\mathbf{A}} = (1/\tau)(\bar{\mathbf{C}}^{-1} - \mathbf{A})$ відносно тензорної змінної $\mathbf{A} = \mathbf{P}_X \mathbf{P}_X^T$, що визначається за розкладанням мікродеформації $\mathbf{P} = \bar{\mathbf{F}} \mathbf{P}_X$. Характерний час релаксації при цьому виявляється прямо пов'язаним з коефіцієнтом дифузії $1/\tau = 6D^\lambda$. В'язка частина вільної енергії визначається за значеннями правого тензора Коші-Гріна $\bar{\mathbf{C}}$ і внутрішньої змінної $\mathbf{A}$ у формі, подібній до неогуківського матеріалу

$$\bar{\Psi}^v = \bar{\Psi}^v(\bar{\mathbf{C}}, \mathbf{A}) = 0,5 \mu^v [(\mathbf{A} : \bar{\mathbf{C}} - 3) - \ln(\det \mathbf{A})] \quad (6)$$

та інваріантній відносно обертань мікроструктури. Виходячи із залежності (6) від міри макроскопічної деформації, в'язкопружні напруження визначаються наступним значенням тензора Кірхгофа: $\bar{\tau}^v = \bar{\mathbf{F}} [2\partial_{\bar{\mathbf{C}}} \bar{\Psi}^v(\bar{\mathbf{C}}, \mathbf{A})] \bar{\mathbf{F}}^T = \mu^v \bar{\mathbf{F}} \mathbf{A} \bar{\mathbf{F}}^T$. Запропонована модель відзначається простотою чисельної реалізації за допомогою інтегрування неявним методом Ейлера і може бути легко застосована у скінченно-елементному аналізі елементів конструкцій з гуми та подібних їй матеріалів. Таким чином, побудована нова, більш досконала, модель DbTN (Diffusion-based Transient Network) деформування в'язкопружних полімерів.

Неткані матеріали. Останнім часом широке застосування отримали неткані матеріали. Для дослідження їх деформування застосовано розроблений авторський підхід шляхом побудови дискретних моделей, що відтворюють пружні та дисипативні механізми деформування. Зокрема, особливу увагу привертає механізм непружного проковзування волокон у вузлі із тертям (рис. 7). Окреме волокно, подане на рис. 8, поділяється на сегменти s , розташовані між послідовних вузлів i та j починаючи з лівого до правого краю, на яких волокно обривається вільними кінчиками. Реакція сегментів волокон до розтягування, за якого змінюється відстань між вузлами R_s , - додатна осьова сила N_s . Ця сила є пропорційною лінійній деформації

$$\epsilon_s = \{(R_s - L_s)/L_s, R_s > L_s; 0, R_s \leq L_s, \quad (7)$$

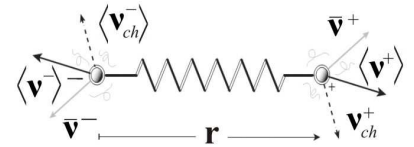


Рис. 6. Лагранжеве подання броунівського руху гнучких полімерних ланцюгів

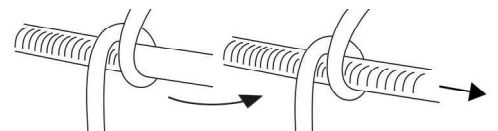


Рис. 7. Механізм відносного проковзування волокон у вузлі: при перевищенні зусилля праворуч частина суцільного волокна зліва протягується на іншу сторону

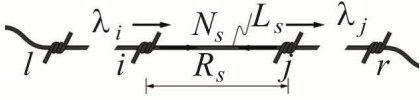


Рис. 8. Окреме волокно, розгорнуте у поздовжньому напрямку

де відображено особливість поведінки гнучких волокон. Вони втрачають стійкість за стиснення та вільно вигинаються без жодного подовження, а, отже, - і сили. Відповідно до цього внутрішня енергія є квадратичною функцією

деформацій $\psi_s = 0,5 E A \epsilon_s^2 L_s$. Під час проковзування внаслідок того, що різниця сил натягу з обох сторін перевищує спротив сил тертя в ньому, відбувається перетягування окремих частин волокон, а довжини сусідніх сегментів зазнають змін. Повна довжина волокна L_f при цьому, вочевидь, зберігається, а зміни довжин сегментів і вільних кінців визначаються наступним чином: $\dot{L}_{ij} = \lambda_i - \lambda_j$, $\dot{L}_l = -\lambda_l$, $\dot{L}_r = \lambda_r$.

Окреме волокно можна розглядати як дисипативну механічну систему. Зовнішній вплив на неї задається зміною відстаней між вузлами і відповідним вектором подовження сегментів $\mathbf{R} = \{R_s\}$. Внутрішній стан, залежно від історії, у свою чергу, визначається значеннями $\mathbf{L} = \{L_s\}$. У кінцевому рахунку, завдання полягає у визначенні відгуку системи, тобто сил натягу сегментів $\mathbf{N} = \{N_s\}$. Для неперервного процесу швидкість дисипації повинна задовольняти так званій нерівності Клаузіуса-Планка – $D = W - \dot{\psi} \geq 0$: зовнішня робота повинна бути більшою, ніж приріст внутрішньої енергії системи для будь-якого допустимого процесу. Зовнішня робота $W = \sum N_s \dot{R}_s = \mathbf{N} \cdot \dot{\mathbf{R}}$ здійснюється проти внутрішніх сил N_s в кожному сегменті. Повна ж внутрішня енергія волокна обчислюється як сума енергії розтягнення окремих його сегментів $\psi = \psi(\mathbf{R}, \mathbf{L}) = \sum \psi_s(R_s, L_s)$. До опису поведінки проковзування волокон застосований стандартний математичний апарат дисипативних систем. Для опису незворотних змін внутрішніх параметрів системи $\mathbf{I}$ потрібно додатково задати потенціал дисипації $\phi(\mathbf{R}, \mathbf{I}, \dot{\mathbf{I}})$. Еволюція системи визначається відомим рівнянням Біо відносно термодинамічно спряженої сили

$$\mathbf{F} = -\partial_{\mathbf{I}} \psi(\mathbf{R}, \mathbf{I}) \in \partial_{\dot{\mathbf{I}}} \phi(\mathbf{R}, \mathbf{I}, \dot{\mathbf{I}}). \quad (8)$$

Для сил тертя, що не залежать явно від швидкості деформацій, потенціал дисипації є однорідною функцією ступеня 1, яку можна еквівалентно визначити за її субдиференціалом в нулі за даних $\mathbf{R}$ та $\mathbf{I}$. Ця множина містить усі допустимі значення сил $\mathbf{F}$, за яких поведінка системи є пружною, та які задовольняють відповідній системі нерівностей:

$$\mathbf{E}(\mathbf{R}, \mathbf{I}) = \partial_{\dot{\mathbf{I}}} \phi(\mathbf{R}, \mathbf{I}, \dot{\mathbf{I}} = \mathbf{0}) = \{\mathbf{F} \mid f_{\alpha}(\mathbf{R}, \mathbf{I}, \mathbf{F}) \leq c_{\alpha}, \alpha = 1, \dots, m\}. \quad (9)$$

Остаточно еволюційні рівняння (8) набувають вигляду

$$\dot{\mathbf{I}} = \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} \partial_{\mathbf{F}} f_{\alpha}(\mathbf{R}, \mathbf{I}, \mathbf{F}); \lambda_{\alpha} (f_{\alpha} - c_{\alpha}) = 0, \lambda_{\alpha} \geq 0, f_{\alpha} \leq c_{\alpha}, \quad (10)$$

де потенціал дисипації подається набором коефіцієнтів Лагранжа $\phi = \sum \lambda_{\alpha} c_{\alpha}$.

Структура наведених співвідношень повною мірою повторює співвідношення для пружно-пластичного матеріалу, для якого область пружних напружень обмежується системою поверхонь течії. Застосуємо цю теорію до проковзування тонких волокон у вузлах з тертям, обравши як змінні історії навантаження $\mathbf{I} : \gamma = \{\gamma_i\}$, де γ_i – повна величина проковзування уздовж вузла j . Відповідно сили, спряжені проковзуванням γ_i , обчислюються як $F_j = -\partial_{\gamma_j} \psi = \underbrace{EA(\epsilon_{j,j+1} - \epsilon_{j-1,j})}_{\Delta N_j} \times (1 + (\epsilon_{j,j+1} + \epsilon_{j-1,j})/2)$. Праву та ліву частину

нерівностей відносно них можна отримати з умов обмеженості сил тертя $|\Delta N_j| \leq \Delta N_j^Y$, а саме: $f_j = |F_j|$, $\{c_j = \Delta N_j^Y [1 + (\varepsilon_{j,j+1} + \varepsilon_{j-1,j})/2]\}$; або $c_j = \Delta N_j^Y (1 + \varepsilon^Y/2)$, де $\varepsilon^Y \equiv \Delta N_j^Y / EA$. Поділяючи додатково системи ковзання на додатну та від'ємну, остаточно приходимо до асоціативного закону течії (9) у вигляді: $\dot{\gamma}_j = \lambda_{j+} - \lambda_{j-}$. Представлена модель FbFN (Friction bonded Fiber Network) описує дисипативні механізми у нетканих матеріалах.

Таким чином, у розділі знайшли відображення теоретичні основи дослідження механіки мережових структур на базі нових підходів, моделей і методів статистичної мікромеханіки. Вони знайшли застосування при дослідженні деформування захисних, силових та функціональних структур із такого типу матеріалів (див. розд. 6, 7).

У **розділі 4** міститься опис моделей та методів для аналізу контактної взаємодії складнопрофільних тіл із урахуванням нелінійних властивостей поверхневих та проміжних шарів. Він базується на послідовному розгляді контакту: 1) гладких тіл; 2) тіл із проміжним лінійно-пружним шаром; 3) тіл із проміжним нелінійно-пружним шаром. Зокрема, при використанні кусково-лінійних пірамідальних базисних функцій, визначених на регулярній трикутній сітці з кроком c на поверхні контакту, для апроксимації контактного тиску p , отримуємо для випадку гладких тіл систему співвідношень

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_m C_{nm} p_m + h_n - \delta = 0, \text{ вузол } J_n - \text{ в контакті;} \\ \sum_m C_{nm} p_m + h_n - \delta > 0, \text{ вузол } J_n - \text{ поза зоною контакту;} \end{array} \quad \sum_m \sqrt{3} c^2 p_m / 2 = P. \right\} \quad (11)$$

Тут C – матриця коефіцієнтів впливу, обчислена за моделлю пружного напівпростору для цих елементів, δ і h – зближення тіл та значення початкового зазору між ними, p_m – невідомі вузлові значення контактного тиску, P – притискна сила.

При введенні між контактуючими тілами лінійно-пружного шару всі співвідношення (11) залишаються у силі, за винятком заміни коефіцієнтів матриці жорсткості C на коефіцієнти модифікованої матриці

$$C^\Sigma = C + \text{diag}(\lambda), \quad (12)$$

де λ – вузлова контактна податливість (у загальному випадку – нерівномірна у вузлах, на відміну від рівномірної, тобто коли $C^\Sigma = C + \lambda E$, а E – одинична матриця).

Моделі контакту тіл із розташованим між ними нелінійним вінклеровим шаром надають можливості урахування надзвичайно широкого спектру явищ і властивостей, пов'язаних із складом та будовою поверхонь. Навіть відносно простий локальний закон податливості, який подається загальною функцією залежності $w \equiv u_z^\wedge = u_z^\wedge(p) \equiv w(p)$ змінання від тиску, є цілком достатнім для адекватного наближення реальної поведінки тіл у поверхневому шарі. При цьому до переваг такого підходу належить те, що за його допомогою модель контакту не вимагає істотних змін порівняно із уже відомими для випадку гладких тіл, а лише доповнюється відповідними складовими. Зокрема розв'язувальна система в розгорненому і матричному вигляді вимагає мінімальних змін:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{m_c \in N_c} C_{n_c m_c} p_{m_c} + w(p_{m_c}) - \delta = -h_{n_c}, \quad n_c \in N_c; \\ \sum_{m_c \in N_c} \sqrt{3}/2 \cdot c^2 p_{m_c} = P; \quad p_{m_c} \geq 0; \end{array} \quad \left\{ \begin{array}{l} Cp + w(p) + h = \delta; \\ \delta^- p = \frac{2\sqrt{3}}{3c^2} P; \quad p \geq 0. \end{array} \right. \right. \quad (13)$$

Таким чином, вихідна система (13), що містила у лівій частині умов сумісності пе-

реміщень раніше тільки лінійні члени, приростає нелінійними складовими $w(p)$. Іншими словами, структурна нелінійність доповнюється фізичною, і в записі співвідношень лівого верхнього рядка (13) здійснити пряму лінеаризацію, як прийнято у відомих постановках, у загальному випадку не видається можливим. У цьому – принципова відмінність цієї моделі, в роботі названої структурно-фізично нелінійною, від традиційних структурно нелінійних, але фізично лінійних. Співвідношення (13) або їм аналогічні можуть бути отримані також із узагальнення варіаційного принципу Кальєра

$$\left\{ \Phi(p) = \frac{1}{2} \int_{(S)} p u_z dS + \int_{(S)} p(h - \delta) dS + \int_{(S)} \left[\int_0^p w(p) dp \right] dS \rightarrow \min; p(\xi, \eta) \geq 0 \text{ в } S. \right. \quad (14)$$

Тут третій доданок у виразі $\Phi(p)$ описує енергію деформування нелінійно пружного шару. Таким чином, можна запропонувати універсальний спосіб побудови математичної моделі контактної взаємодії системи СПТ за наявності нелінійно деформівних проміжних шарів. Він полягає у формуванні функціоналу $\Phi(p)$, що містить енергію пружного деформування усіх компонентів системи. У силу адитивності функціонала $\Phi(p)$ така процедура не становить значної складності. При цьому кожний додатковий доданок в $\Phi(p)$ може привносити нові види нелінійності. Це буде проявлятися на етапі застосування гранично-елементної апроксимації та квадратурних формул для обчислення дискретизованого аналога цього функціоналу. Після накладання вимоги мінімізації вже дискретизованого функціоналу $\Phi(p)$ можна або отримати умови у вузлах дискретизації, або запропонувати процедуру мінімізації на невід'ємних значеннях вузлових величин контактного тиску. Представлений підхід застосовний і для тіл скінчених розмірів, якщо для визначення коефіцієнтів матриці C залучити чисельне інтегрування за МСЕ.

Розроблена модель контактної взаємодії СПТ – гладких, шорсткуватих і тіл за наявності між ними у загальному випадку нелінійних пружних шарів призводить до структурно-фізично нелінійної системи співвідношень. Для розв'язання цієї системи співвідношень необхідно розробити нові методи. Якщо, не знижуючи загальності, прийняти нелінійну модель пружного шару вигляду $w = \bar{\lambda} \cdot p^s$, де $\bar{\lambda}, s$ – деякі емпіричні або обчислювані параметри, то, як зазначалося вище, зміниться сам вигляд рівнянь сумісності переміщень точок контактуючих поверхонь взаємодіючих тіл (з лінійних вони перетворюються у нелінійні). Таким чином, структурні нелінійності, тобто умови контактної взаємодії у вигляді умов непроникнення взаємодіючих тіл одне в одне, які в першому наближенні традиційно містять тільки лінійні функції від переміщень, доповнюються нелінійними складовими. У результаті формально співвідношення сумісності можна звести до системи нелінійних рівнянь. Отже, виникає задача розробки методів розв'язання таких задач.

Метод додаткових зазорів (МДЗ). Якщо записати співвідношення сумісності переміщень у вигляді підсистеми $C p = \delta - h - \bar{\lambda} q$; $q = \{p_1^s, p_2^s, \dots, p_N^s\}^T$, то формально її можна подати як

$$C p = \delta - \bar{h}, \text{ де } \bar{h} = \bar{h}(p) = h + \bar{\lambda} q = h + \Delta h(p). \quad (15)$$

Тоді співвідношення (15) формально повторюють лінійні співвідношення у (13), але в яких початковий зазор h доповнений деякими компенсаційними складовими $\Delta h(p)$. За аналогією з методом додаткових навантажень ці складові можна назвати додатковими зазорами. Рівняння (15) є нелінійним операторним рівнянням, для якого дійсний розподіл контактного тиску є нерухомою точкою оператора повної системи рівнянь

$K\{h, \delta\}^T = \{h, P\}^T$ за умов $p \geq 0$. Таким чином, можна організувати ітераційний процес:

$$\begin{cases} \tau := 0; (*) \quad p^{(\tau)} := 0; (**) \quad q^{(\tau)} = \left[\left[p_1^{(\tau)} \right]^S, \dots, \left[p_N^{(\tau)} \right]^S \right]^T; (***) \quad \Delta h^{(\tau)} = \bar{\lambda} q^{(\tau)}; (\wedge) \\ \bar{h}^{(\tau)} = h^{(0)} + \Delta h^{(\tau)}; (\wedge\wedge) \quad \{p^{(\tau)}, \delta^{(\tau)}\}^T = K^{-1} \left\{ \bar{h}^{(\tau)}; P \right\}^T; (\wedge\wedge\wedge) \quad \tau := \tau + 1. (:) \end{cases} \quad (16)$$

У підсумку, розв'язок поставленої задачі еквівалентний розв'язку задачі (13) для контакту гладких тіл, але зі скоригованим розподілом зазорів.

Метод змінних параметрів податливості (МЗПП). Подавши рівняння сумісності переміщень в системі (13) як

$$C p + (\bar{\lambda} p^{(s-1)}) \cdot p = \delta - h, \quad (17)$$

і ввівши позначення $\bar{\lambda}(p) = \bar{\lambda} p^{(s-1)}$, за аналогією з методом змінних параметрів пружності (17) можна переписати у вигляді $\bar{C} p = \delta - h$, $\bar{C}(p) = C + \bar{\lambda} \cdot E$. (18)

Для розв'язання (18) організовано ітераційний процес, у якому перебудові піддається не права частина системи рівнянь при незмінній за структурними компонентами підматрицею C , а, навпаки, змінюється сама матриця, в той час як права частина – стала.

Із використанням цих методів розв'язано низку тестових задач (рис. 9). Варійованими тут є пружні характеристики, тобто залежності $w(p)$. Були розглянуті наступні типи нелінійностей (рис. 10): пружно-жорстка характеристика (рис. 10, а); «коренева» характеристика типу $w = \bar{\lambda} \sqrt{p}$ (рис. 10, б); білінійна характеристика (рис. 10, в). Результати – на рис. 11 (тут 1 – білінійна залежність, $\alpha_a = \arctg 0,5$; 2 – пружно-жорстка залежність $w(p)$, $\alpha_a = 0,5$; 3 – контакт

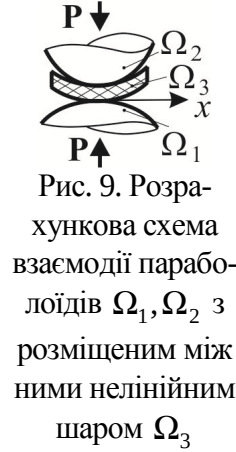


Рис. 9. Розрахункова схема взаємодії параболоїдів Ω_1, Ω_2 з розміщеним між ними нелінійним шаром Ω_3

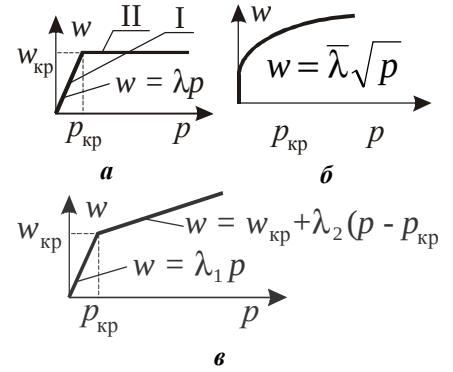


Рис. 10. Нелінійні характеристики $w(p)$

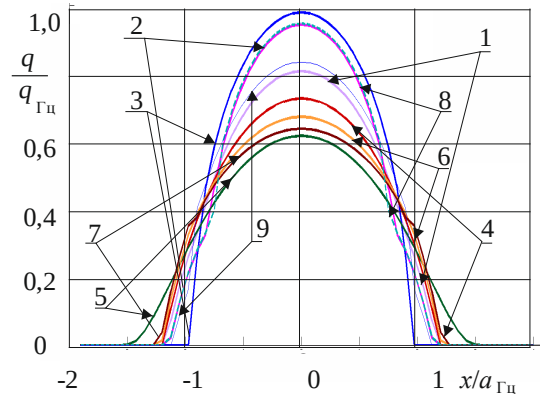


Рис. 11. Розподіл контактного тиску, віднесеного до максимального тиску за моделлю Герца, в осьовому перерізі

гладких параболоїдів; 4 – контакт параболоїдів з лінійно-пружним вінклеровим шаром, $\lambda = 10C_{nn}$; 5 – «коренева» залежність $w(p)$; 6 – білінійна залежність, $\alpha_2 = \arctg 1,5$; 7 – білінійна залежність, $\alpha_2 = \arctg 2$; 8 – пружно-жорстка залежність $w(p)$, $\alpha_a = 0,5$; 9 – білінійна залежність, $\alpha_2 = \arctg 1,5$.

Розроблені методи розв'язання розв'язувальної системи співвідношень продемонстрували досить високу точність. Це дає можливість переходити до розв'язання прикладних задач із їх застосуванням.

У **розділі 5** описані формулювання задачі про обґрунтування раціональної форми поверхонь контактуючих тіл та властивостей матеріалу проміжних шарів. При цьому описане розв'язання наступних задач: формування взаємообернених систем розв'язувальних співвідношень; аналізу контактної взаємодії та обґрунтування геометричної форми контактуючих тіл; обґрунтування сприятливого профілю контактуючих деталей за критерієм мінімізації контактного тиску або компонент НДС; створення актуального сприятливого профілю за рахунок додаткової керованої пружної деформації від дії спе-

ціально розрахованої допоміжної системи сил; обґрунтування форми контактних поверхонь залежно від фізико-механічних властивостей пружного проміжного шару між ними; загальна постановка задачі аналізу чутливості розв'язків контактних задач до зміни варійованих параметрів системи розв'язувальних співвідношень. Зокрема, здійснена загальна постановка задачі про визначення впливу особливостей розподілу початкового зазору між СПТ на розподіл контактного тиску із урахуванням фізичної та структурної нелінійності. Побудована узагальнена система співвідношень для урахування мікрOMEХАНІЧНИХ моделей контактної взаємодії шорстких та модифікованих поверхонь із урахуванням фізичної та структурної нелінійності.

Аналізуючи систему розв'язувальних співвідношень

$$\begin{cases} h_n = \delta - \sum_m C_{nm} p_m, n, m \in I_c; P = \sqrt{1,5} c^2 \sum_m p_m; p_m \geq 0; h_n \geq \delta - \sum_m C_{nm} p_m, n, m \notin I_c, \end{cases} \quad (19)$$

її у загальному випадку можна записати у вигляді відображення T множини $\{h, P\}$ на множину $\{p, \delta\}$: $\{p, \delta\} = T\{h, P\}$; $\Pi = \{p, \delta\}^T = K^{-1}\{h, P\}^T$; $\Pi = K^{-1}H$. (20)

Задачу (20) можна обернути: $\{h, P\} = T^{-1}\{p, \delta\}$; $H = \{h, P\}^T = K\{p, \delta\}^T$; $H = K\Pi$. (21)

Отже, отримуємо пару взаємнообернених задач (20), (21), причому вони – формально лінійні. Якщо ж розглянути загальний випадок структурно-фізичної нелінійності $\lambda = \lambda(p, x, y)$, то система співвідношень у (19) поповнюється нелінійними складовими і набуває вигляду $\{h = \delta - \sum_m C_{nm} p_m - w(p_n), n, m \in I_c; P = \sqrt{3/2} \cdot c^2 \sum_m p_m$. Таким чином,

формально лінійна система лінійних рівнянь такою перестає бути, однак при цьому у певному сенсі зберігається властивість взаємнооднозначної відповідності (21).

Також розглянуті методи обґрунтування сприятливого профілю контактних поверхонь за критерієм мінімізації контактного тиску або компонент НДС. При цьому на розподіл контактного тиску p або на компоненти НДС накладається деяка вимога (цільова функція) вигляду: $p^{\max} \rightarrow \min, \sigma^{\max} \rightarrow \min$, де $p^{\max}$ – максимальний контактний тиск у плямі контакту; а $\sigma^{\max}$ – максимальне значення деякої критеріальної величини, що є функцією компонент НДС і характеризує міцність контактуючих тіл.

Окремої уваги заслуговують розроблені методи створення актуального сприятливого профілю контактних поверхонь за рахунок додаткової керованої пружної деформації від дії спеціально розрахованого допоміжного навантаження F_{ad} , яке діє незалежно від експлуатаційного, з одного боку, а, з іншого, – може під нього адаптуватися:

$$Cp + D(p) = \delta - (h + v(F_{ad})). \quad (22)$$

Здійснена також загальна постановка задач аналізу чутливості при дослідженні контактної взаємодії СПТ. Для цього співвідношення (13) подаються як

$$\{C^{\wedge} p + D(p)p + h - \delta p' = 0, \sum_m p_m = P^{\wedge}, P^{\wedge} = [(2\sqrt{3})/3c^2]P. \quad (23)$$

Співвідношення (23) визначають систему рівнянь щодо невід'ємних p_n всередині області зближення δ . Відповідно, можна обчислювати на основі застосування скінченно-різницевої апроксимації чутливості розв'язків до зміни певних параметрів.

На розробленій основі здійснено розв'язання системи тестових задач контактної взаємодії та синтезу поверхонь СПТ із урахуванням фізичної та структурної нелінійно-

сті. Зокрема, досліджено вплив форми профілю поверхонь контактуючих СПТ на розподіл контактної тиску між ними. Для прикладу розглядається задача про осесиметричний контакт СПТ, зазор між якими записується у вигляді $h = G_1 \cdot [(x^2 + y^2)^{K/2} / a^K] + G_2 \cdot [(x^2 + y^2)^{L/2} / a^L]$, де $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – радіус-вектор поточної точки у дотичній площині xy , $K = 2$, $L = 4$; G_1, G_2 – варійовані параметри ($G_1 + G_2 = 1$). Надалі визначався p_H – максимальний контактний тиск, що отриманий при розв'язанні задачі Герца ($K = 2$, $\lambda = 0$); а також a_H – розмір контактної плями, що отримано при розв'язанні задачі Герца ($K = 2$, $\lambda = 0$). Відповідно, у розгляд введено безрозмірні величини $x_a = x / a_H$, $q = p / p_{H \max}$. На рис. 12 наведені розподіли контактної тиску у осьових перерізах (відносна податливість $\lambda - L$).

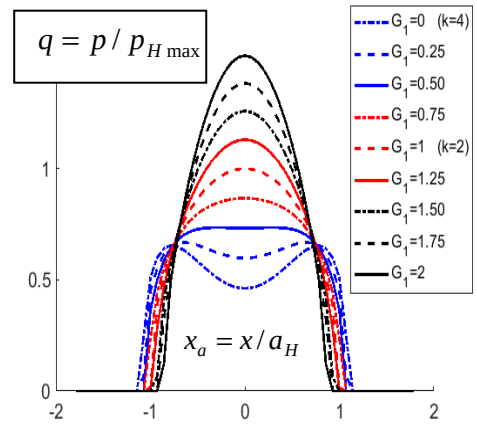


Рис. 12. Залежність контактної тиску від параметрів при $\lambda = 0$

Становить інтерес визначення різного закону розподілу зазору у різних напрямках на контактний тиск у сполученні СПТ. Розглядається задача визначення контактної тиску між СПТ, зазор між якими має вигляд $h = U(x/a)^K + V(y/b)^L$. Тут K і L – ступені розподілів зазорів у перерізах $y = 0$ та $x = 0$. На рис. 13 наведені характерні розподіли контактної тиску. Для визначення впливу збурення форми зазору в окружному напрямку на розподіл контактної тиску у сполученні СПТ розглядається закон зміни крутизни зазору в окружному напрямку: $h = U(r/a)^S$, $S = 2 + \varepsilon \cdot \sin(n\varphi)$, де φ – кут між віссю x та ра-

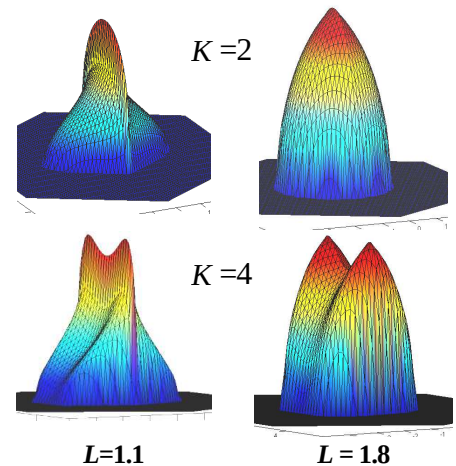


Рис. 13. Розподіл контактної тиску у сполученні СПТ

діус-вектором поточної точки; $n = 2$; ε – варійований параметр. На рис. 14 наведені картини розподілу інтенсивності контактної тиску при різних параметрах ε .

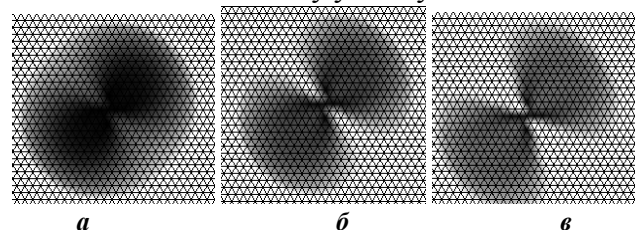


Рис. 14. Картини розподілу інтенсивності контактної тиску при варіюванні ε :
 $a - 0,5$; $b - 1,0$; $v - 1,5$

Аналіз представлених результатів свідчить про сильний вплив форми розподілу зазору та фізико-механічних властивостей проміжних шарів на баланс внеску «локальної» та «глобальної» податливостей контактуючих тіл сумісно із зазором у загальне зближення контактуючих тіл, а також на характер розподілу та рівень контактної тиску. Таким чином, шляхом варіювання цими величинами можна впливати на властивості розподілу контактних зусиль, а, відповідно, і на НДС контактуючих СПТ.

Описані у розд. 2–5 підходи, моделі, методи та засоби дали можливість перейти до прикладних досліджень.

У розділі 6, зокрема, здійснено та описано аналіз деформування волоконних, нетканних та полімерних матеріалів, а також НДС кульових поршнів ГОП, роликів, прес-форм та універсально-збірних верстатних пристосувань.

Розв'язана низка задач пружної гомогенізації матеріалів, мікроструктура яких статично міцно зшита у сітку, а також розглянуті докладно два практично значущих типи відгуку волокон на розтягнення. Зокрема, визначення неафінної деформації мереж гнучких ланцюжків.

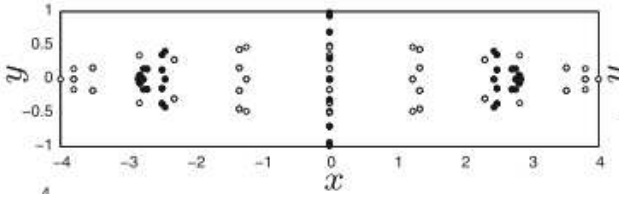


Рис. 15. Неафінні мікродеформації λ^* , що передбачаються МАРС моделлю (заповнені точки) для сітки з межею розтяжності ланцюжків $\sqrt{N} = 3$, порівняно з афінним розтягненням $\bar{\lambda}$ (порожні точки) при одноосовому розтягненні з $\lambda_x = 4$

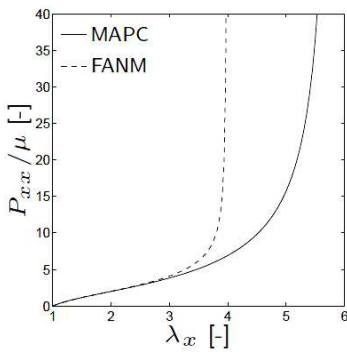


Рис. 16. Відгук за одно-вісного розтягнення для мережі з межею розтяжності ланцюжків $\sqrt{N} = 4$

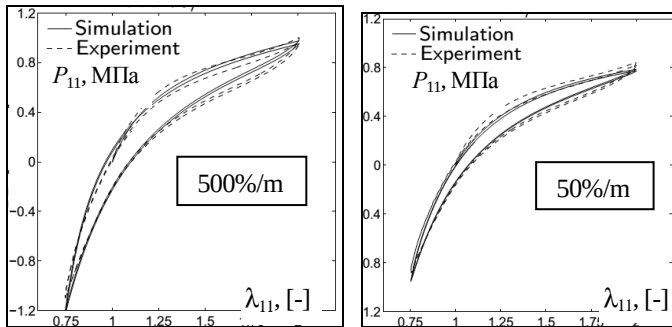


Рис. 17. Найкраще наближення експериментальних кривих чисельною моделлю

ментів (фракцій). Установлені співвідношення для пружних властивостей таких двофракційних матеріалів. Вони принципово відмінні від традиційних (наприклад, правило сумішей тощо).

Розроблені поширені моделі на випадок адгезійного контакту пружних тіл. Відштовхуючись від варіаційного формулювання Джонсона-Кенделла-Робертса, для осесиметричних тіл побудована дискретна форма розв'язувальних співвідношень. Пропонується ввести наступний міні-макс принцип:

$$\max_C \min_p \Phi[p, C] = \frac{1}{2} \int_C p \cdot u[p] dS + \int_C p \cdot (h - \delta) dS + \int_C \gamma dS, \quad (24)$$

де C – шукана область контакту, p – шуканий розподіл контактного тиску, $u[p]$ – перемі-

щення. Здійснений цикл досліджень продемонстрував можливості та переваги створеної моделі МАРС для аналізу деформування матеріалів із мережевою структурою. Установлено, що для гнучких ланцюжків, відмінних від гауссових, мікродеформації у мережі є істотно неафінними (рис. 15, точками у проекції площин x - y і z - y подані кінці векторів мікродеформацій). Крім того, завдяки перерозподілу деформацій волокна досягають межі подовження при більших значеннях розтягнення порівняно з афінною моделлю (рис. 16).

Як основний матеріал для цієї мети обраний нітрил-бутадієновий каучук HNBR50. Для нього визначені параметри чисельної моделі, якими наближаються результати одноосових циклічних випробувань у інтервалі $\lambda_1 \in [0.75; 2.0]$. Ці значення перевіряються далі на відповідність виміряній поведінці за циклічного стиснення $\lambda_1 \in [0.75; 1.0]$, а також під час випробування розтягненням-стисненням $\lambda_1 \in [0.75; 2.0]$ із зупинками. Здійснено розрахунок МСЕ неоднорідних деформацій у зразку, підданому зсуву. Використані експериментальні дані, наведені у роботі Miehe C., Göktepe S. (рис. 17). Виявлено задо-

вільну збіжність чисельних даних із експериментом (рис. 18). 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 у результаті поєднання двох компонент із різними властивостями структурних еле-

щення на поверхні пружного напівпростору, які обчислюються у формі інтегралу із сингулярним ядром фундаментального розв'язку задачі Бусінеска, γ – поверхнева енергія.

Шляхом апроксимації невідомих функцій здійснено дискретизацію функціоналу (24) у вигляді: $\Phi[p_a, C] = 0,5 p_a B_{ab} p_b + p_a W_{aj} (h_j - \delta) + \gamma |C|$, де p_a та h_j є вузловими значеннями шуканого контактного тиску та заданого початкового зазору, а коефіцієнти білінійних форм W_{aj} обраховуються за обраними базисними функціями.

Якщо обмежитися припущенням, що контакт здійснюється виключно на круговій області із центром на осі симетрії, то її зміну можна описати єдиним числовим параметром, а саме розміром s : $C(s) = sC(1) = \{x : |x| < S\}$. Для кусково-постійних базисних функцій умови стаціонарності наближеного функціоналу $\Phi[p_a, C(s)] = \Phi[p_a, s] = 0,5 p_a B_{ab} p_b + p_a W_{aj} (h_j - \delta) + \pi \gamma s^2$ є системою нелінійних рівнянь $\{B_{ab} p_b + W_{aj} (h_j - \delta) = 0$; $0,5 p_a (\partial B_{ab} / \partial s) p_b + p_a (\partial W_{aj} / \partial s) (h_j - \delta) + p_a W_{aj} (\partial h_j / \partial s) + 2\pi \gamma s = 0$, із якої можна отримати вузлові значення контактного тиску p_a та радіус кругової плями контакту s . Чисельний розв'язок одержується методом Ньютона-Рафсона.

На цій основі досліджено контакт пружної сфери із гладкою та хвилястою поверхнями $h(r)$ із напівпростором (рис. 19). Установлена наявність багатьох нестійких ділянок на кривій «сила – радіус плями контакту». Тому для визначення повних кривих застосовано метод подовження типу Arc-Length. Одержані чисельні розв'язки (рис. 20) знаходяться у повній відповідності як із даними аналітичного, так і експериментального дослідження. Отже, доведена ефективність розроблених моделей та методів для ще більш широкого кола задач.

Значну увагу у роботі приділено чисельному аналізу НДС гідрорепердачі трансмісії для важких гусеничних машин. Для їх оснащення перспективним є застосування гідрооб'ємної передачі, зокрема, ГОП-900, що розроблена ДП «ХКБМ».

Одним із чинників, які стримують досягнення високих робочих режимів її роботи, є міцність кулькового поршня під час взаємодії із профільованою біговою доріжкою статора (рис. 21). Відповідно, у цій роботі поставлені та розв'язані наступні задачі.

1. Вплив контактної жорсткості проміжного шару на закон розподілу та рівень контактного тиску між кульковим поршнем та біговою доріжкою ГОП-900. За допомо-

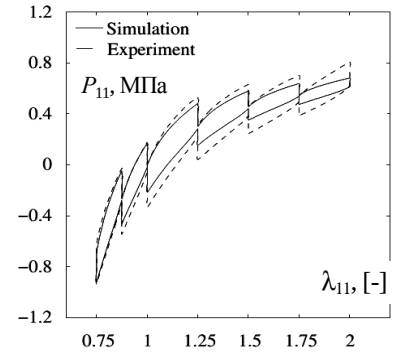


Рис. 18. Порівняння експериментальних даних із чисельними результатами для одноосного розтягування-стискування з релаксаційними зупинками

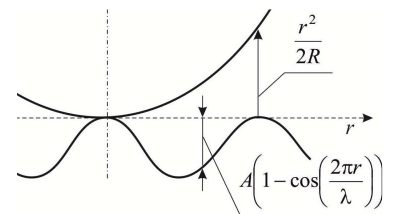


Рис. 19. Контакт пружної сфери з косинусоїдальною хвилястою поверхнею обертання

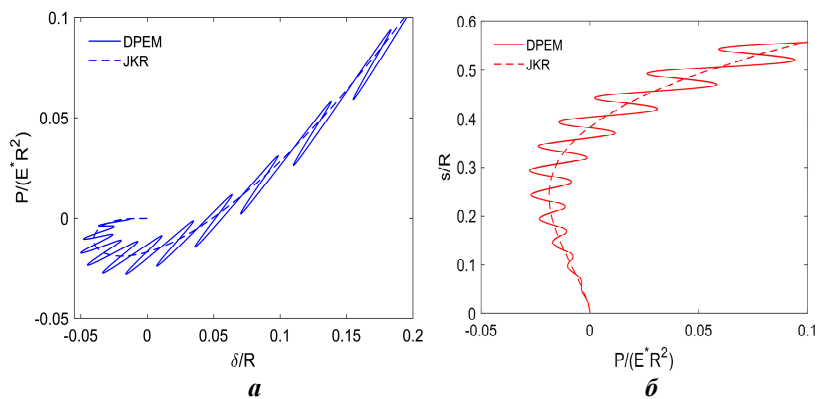


Рис. 20. Обчислені рівноважні криві для $A/\lambda = 0.05$, $\lambda/R = 0.05$ та $\gamma' = 0.025$ порівняно із контактом гладких поверхонь згідно JKR: а – сила взаємодії; б – радіус плями контакту

трьома індексами: $\bar{V} = \{\alpha, \beta, \gamma\}$, де $\alpha = I, II, III$; $\beta = 1 \div 4$; $\gamma = \{a, b, c\}$. Одержані розподіли та залежності максимального контактної тиску від величини притискного зусилля ($P = 20 \div 200$ кН із кроком 20 кН), рис. 24.

Загальна тенденція зміни розподілів p для варіанту $\gamma = a$ (тобто радіус $R_t^a = 1,05 R_p$) полягає у тому, що для лінійно пружного шару спостерігається монотонне зростання тиску від притискного зусилля. Для нелінійно пружного шару відбувається злам характеру розподілу p при зростанні його рівнів понад p_I , p_{II} відповідно. Разом із тим зменшення коефіцієнту податливості згладжує різницю між розподілами із різними значеннями p_α , де $\alpha = I, II, III$.

Подібні тенденції – також і для випадку $\gamma = b$ (тобто $R_t^b = 1,01 R_p$). Для випадку $\gamma = c$ (тобто $R_t^c = 0,99 R_p$) спостерігається така сама за характером тенденція, проте якщо для випадків $R_t > R_p$ відбувається

поступове зміщення точки максимуму контактної тиску від центру до периферії зі зростанням притискного зусилля, то для випадку $R_t < R_p$ він із самого початку опиняється на периферії області контакту.

Загальною тенденцією є те, що збільшення коефіцієнту податливості призводить до зростання області контакту та зниження рівня контактної тиску. Розрахунок для більшої сукупності варіантів α, β, γ дає можливість одержати більше інформації щодо поведінки розподілів $p_{\max}(P, \alpha, \beta, \gamma)$, а, відповідно, більш докладний масив інформації для обґрунтування технічних рішень. Подібні дослідження здійснені для прес-форм та роликів.

На практиці продемонстровано значний вплив форми тіл та властивостей проміжного шару на міцність та жорсткість ЕМБК які перебувають у контактній взаємодії. Визначені особливості та закономірності разом із розробленими моделями та засобами передані для впровадження у процес розробки та виробництва ЕМБК.

У розділі 7 описані експериментальні дослідження і впровадження результатів в виробництво. Залучені дані власних експериментів, а також описаних у літературі. Так, для нетканих матеріалів залучені дані стосовно поліпропіленового геотекстилю Tyrag® SF32 виробництва DuPont™. Цей матеріал виготовляється з поліпропіленових волокон. Установлені якісні особливості деформування (рис. 25) та кількісні характеристики повністю відповідають експериментальним даним. Для м'яких матеріалів із неоднорідним складом мережі залучені дані експериментів із літературних джерел. Одержані дані узгоджуються

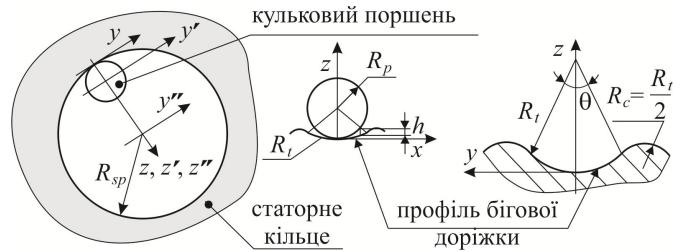


Рис. 23. До розрахункової схеми контактної взаємодії кулькового поршня із біговою доріжкою статорного кільця радіальної ГОП-900

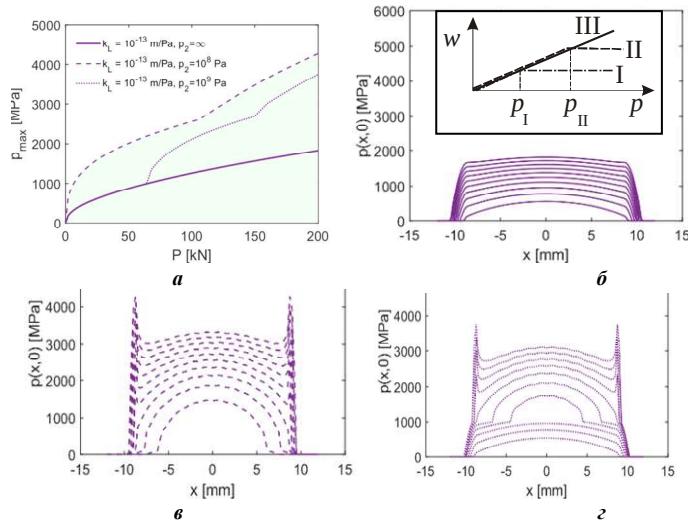


Рис. 24. Залежність максимального контактної тиску від притискної сили за різних значень перегину білінійної податливості за $R_t/R_p = 1.05$ (а) та відповідні розподіли контактної тиску: б – $p_{kp} = \infty$; в – $p_{kp} = 10^8$ Па; г – $p_{kp} = 10^9$ Па

із результатами експериментів (рис. 26, 27, з наближено обчисленими за МГЕ за амплітуди хвиль $A = 0.025\lambda$ та значень хвильового числа $\lambda : \lambda / R = 0,12$).

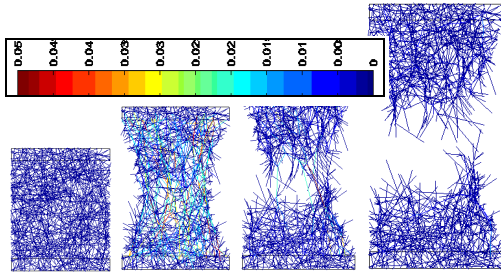


Рис. 25. Деформації нетканної мережі при розтягненні прямокутного зразка нетканого матеріалу за межі сил тертя у вузлах – $\Delta N^y / EA = 0,02$

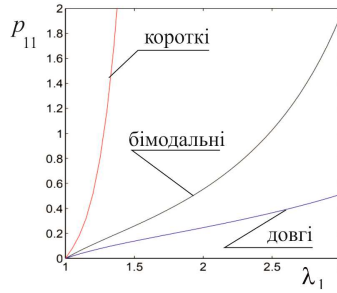


Рис. 26. Осереднені напруження у бімодальній мережі порівняно із унімодальними мережами з коротких та довгих волокон однакової щільності

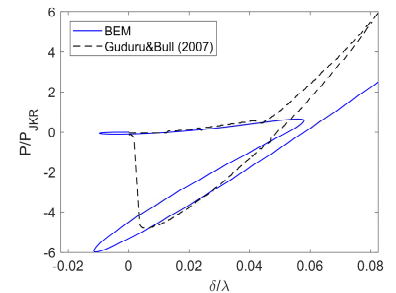


Рис. 27. Порівняння експериментальних кривих притискування-відриву параболічного штамп до пружної основи

Таблиця 1

Радіус профіля бігової дорожки, мм	Кількість шарів гумової смуги		
	0	1	4
62	1/8	2/9	3/10
68,5	4/0	5/4	6/6

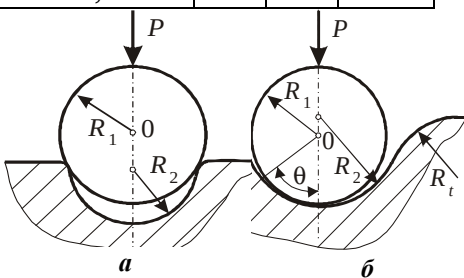


Рис. 28. Характер профілю бігової дорожки початкового контакту з кульовим поршнем при значеннях радіуса її центральної частини: а – менших R_p , б – більших R_p



Рис. 29. Об'єкт досліджень у зборі

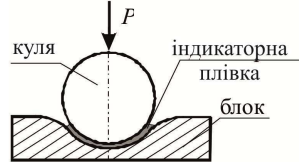


Рис. 30. Схема вимірювання розподілу контактного тиску

рис. 31 наведені результати експериментів при варіюванні радіусів профіля бігової дорожки та кількості шарів гумової смуги.

Як видно, спостерігається повна якісна і задовільна кількісна відповідність отриманих експериментально і чисельно даних. Зокрема, простежується гантелевид-

ний вигляд контактних майданчиків і розподілів контактного тиску. Також при цьому простежується згладжувальний ефект від наявності пружного проміжного шару: зі зростанням кількості шарів контактна площа збільшується, максимальний контактний тиск зменшується, а їхній розподіл набуває більш рівномірного характеру. Таким чином, отримано підтвердження адекватності розробленої математичної моделі та точності чисельних моделей, достовірності отриманих результатів розв'язання тестових і прикладних задач, а також обґрунтованості розроблених на їх основі рекомендацій.

Здійснене також експериментальне дослідження впливу попереднього деформування одного з тіл. На розробленому стенді було створено зміну зазору між тілами за рахунок попереднього деформування одного з них: між цим тілом і основою розміщується в середній частині тонкий циліндр $\varnothing 1,5$ мм, а край притиснутий силами N (рис. 32). У результаті початковий зазор t змінився. На рис. 33 – результати. Як випливає з їх аналізу, для випадку близьких профілів додаткове попереднє деформування може досить сильно вплинути на розподіл контактного тиску. Зокрема, зникає область нульового контактного тиску у центральній частині, а із двозв'язної область контакту перетворюється в однозв'язну. Таким чином, отриманий ефект може бути використаний для управління контактною

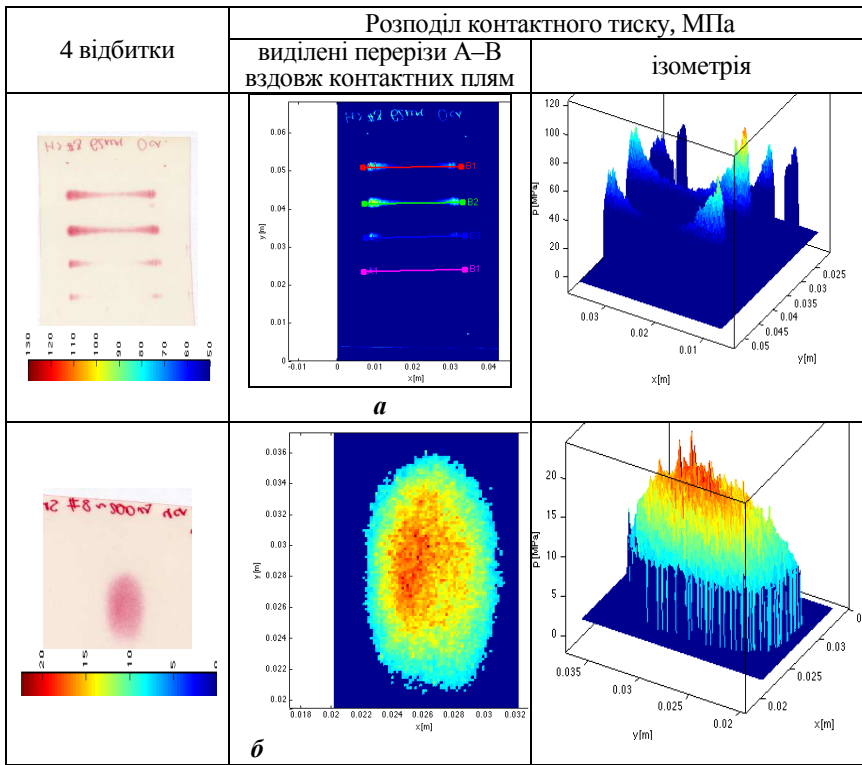


Рис. 31. Результати експериментів (див. табл. 1): а – № 1; б – № 5

повну відповідність результатам чисельних досліджень. Зокрема, підтверджено згладжувальну дію проміжного шару на розподіл контактної тиску.

Впровадження результатів дисертаційних досліджень у виробництво здійснено на низці підприємств України.

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

ВИСНОВКИ

У роботі міститься вирішення актуальної наукової проблеми механіки деформованого 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.

Аналіз розроблених підходів, моделей, методів та установлених за їх допомогою закономірностей дає можливість зробити такі висновки.

1. Аналіз існуючих моделей механіки нетрадиційних матеріалів із мережевою структурою одновимірних елементів (волоконні, полімерні, неткані тощо) дає підстави для висновку про неповну відповідність результатів моделювання, отриманих за їх допомогою, із реальними властивостями цих матеріалів. Також відсутні універсальні методи та моделі контактної взаємодії складнопрофільних тіл із адекватним урахуванням чинників, які набули натеper визначального впливу на їх напружено-деформований стан, зокрема, – фізично нелінійні властивості шорсткості та проміжних шарів між контактуючими поверхнями цих тіл. Разом із тим широке розповсюдження, з одного боку, нетрадиційних полімерних і нетканих матеріалів, а, з іншого, – СПТ, що на практиці знаходяться у контакті у складі машинобудівних конструкцій, потребує таких розробок. Для вирішення протиріччя, що склалося, необхідне створення теоретичних основ та за-

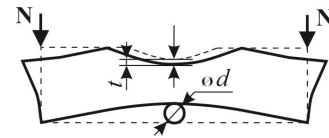


Рис. 32. Схема деформування одного із контактуючих тіл

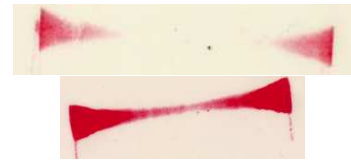


Рис. 33. Контактні відбитки для виїмки $\varnothing 60\text{мм}$ за умов без (зверху) та із дією (знизу) попередніх зусиль деформування

взаємодією СПТ.

Експериментальне дослідження контактної взаємодії елементів універсально-збірних пристосувань, прес-форм та роликів також продемонструвало

собів моделювання деформування нових мережевих матеріалів, а також аналізу контактної взаємодії та НДС ЕМБК із урахуванням фізично нелінійних проміжних або поверхневих шарів. Означені проблемні напрямки склали мету та зміст дисертаційної роботи.

2. Для вирішення сформульованих проблем розроблено загальний підхід, який базується на поєднанні мікро-макромасштабних моделей деформування нетрадиційних матеріалів мережевої структури в об'ємі та НДС контактуючих ЕМБК із шорсткою поверхнею та проміжним шаром на поверхні. У математичному плані розроблені варіаційні формулювання поставлених задач, які зводяться до проблеми пошуку екстремумів нелінійних функціоналів.

3. На основі розроблених удосконалених підходів мікромеханіки просторових мережевих систем одновимірних елементів розроблені моделі деформування нових нетрадиційних матеріалів, а також методи розв'язання системи розв'язувальних співвідношень. Зокрема, для осереднення суцільних мереж створено новий мікромеханічний підхід. Він спирається на нове статистичне подання будови мережі та її деформування, яке базується на урахуванні початкової орієнтації та векторній змінній розтягнення волокон. Цим він відрізняється від більшості аналогічних теорій, які спираються на спрощене подання мережі. Запропоновано концепцію шляхів максимального просування, за допомогою якої було здійснено обґрунтоване поєднання мікро- та макрокінематики. Отримане співвідношення, що пов'язує розтягнення та повороти волокон з макроскопічним градієнтом деформації, є новим результатом у механіці мережевих матеріалів. Із його допомогою сформульовано варіаційний принцип мінімуму осередненої енергії для визначення рівноваги мікромереж та відгуку матеріалу. Для підтвердження основних положень цієї теорії застосовано дискретне моделювання мереж у репрезентативних комірках. Розроблена нова модель в'язкопружності еластомерів, яка спирається на теорію броунівського руху, застосовану до гнучких ланцюжків. Ця модель розширює мікромеханічний підхід на непружну поведінку матеріалів. У дискретних моделях нетканих матеріалів було враховано принципово новий механізм незворотних деформацій та руйнування, пов'язаний із проковзуванням та висмикуванням волокон. За рахунок таких розробок створена методологічна основа досліджень нетрадиційних матеріалів, причому з більш високим рівнем фізичної адекватності, математичної строгості та чисельної ефективності. Це створює основу для більш адекватного та достовірного аналізу деформування такого типу матеріалів порівняно із традиційними моделями та методами.

4. Розроблені методи і моделі для дослідження контактної взаємодії складнопрофільних тіл із урахуванням мікромеханічних властивостей поверхневих і проміжних шарів, які визначають їхню локальну контактну нелінійну жорсткість. У результаті одержано структурно-фізично нелінійні співвідношення. Для них розроблена слабка постановка, що зводиться до пошуку екстремуму модифікованого функціоналу додаткової енергії, визначеного на розподілах контактного тиску. Із застосуванням методу граничних елементів отримано дискретну форму розв'язувальних рівнянь та нерівностей. Для їх задоволення розроблено методи додаткових зазорів та змінних параметрів податливості. Вони зводять структурно-фізично нелінійну задачу до послідовності структурно нелінійних, проте фізично лінійних задач, а для розв'язання таких задач можна застосувати уже розроблені раніше методи. Також розроблено метод поетапного розширення множини чинників, які можуть бути ураховані при розв'язанні контактних задач шляхом

почергового додавання відповідних додаткових чинників у нелінійний функціонал додаткової енергії. У кінцевому підсумку розроблений комплекс підходів, методів та моделей дає можливість, на відміну від традиційних, більш ефективно, адекватно і точно моделювати контактну взаємодію складнопрофільних тіл. При цьому установлені якісно нові закономірності впливу на розподіл контактного тиску профілю контактуючих тіл та властивостей проміжного шару. Зокрема, для нелінійно пружно-жорсткого шару спостерігається комбінація еліпсоїдальної та параболоїдальної розподілів із перехідною поверхнею між ними. Також проміжний шар згладжує розподіл контактного тиску та розширює область контакту. У ході розв'язання низки тестових задач продемонстровано точність та збіжність розроблених методів досліджень типу методів додаткових зазорів та змінних параметрів податливості.

5. Розроблено єдину систему розв'язувальних співвідношень для аналізу, з одного боку, НДС та контактного тиску у спряженнях складнопрофільних тіл, а з іншого – обґрунтування геометричної форми їх поверхонь та властивостей проміжних шарів. Це дає можливість розв'язувати обернені задачі синтезу геометричної форми СПТ із умов реалізації заданого розподілу контактного тиску. Виходячи із цього, запропоновано метод коригування геометричної форми поверхонь контактуючих тіл за рахунок пружного деформування від спеціально підібраного додаткового навантаження.

6. Із застосуванням створених методів, моделей та засобів досліджень розв'язано низку модельних та прикладних задач. Зокрема, визначено характер деформування нетрадиційних матеріалів із мережевою структурою одновимірних елементів. Установлено макровластивості цих матеріалів на основі розроблених мікромеханічних моделей та методів осереднення. Так, при моделюванні структури нетканого матеріалу на основі дискретно-елементного підходу, заснованого на поданні сегментів волокон між вузлами як окремих елементів, показано вплив величини тертя у вузлах на межу міцності матеріалу і його податливість; продемонстровано наявність ефекту розмірності, яка полягає в тому, що менші за розміром зразки мають меншу податливість і руйнуються внаслідок розриву волокон, а не їхнього висмикування. На основі феноменологічного підходу, що поділяє структуру полімерного матеріалу на статично пружну частину і змінну в часі в'язку частину, запропонована мікроструктурна модель для опису його відгуку на навантаження. Продемонстрована здатність розробленої моделі відтворити реальну поведінку синтетичного каучуку за різних видів навантаження, відповідно до отриманої за експериментальних досліджень; визначені параметри моделі, що дають найкраще наближення. Також визначені особливості розподілу контактного тиску у спряженні контактуючих СПТ. Установлені закономірності впливу різних чинників на контактний тиск і контактні області. Обґрунтовані рекомендації щодо технічних рішень для елементів машинобудівних конструкцій, що забезпечують їх міцність. Усі розроблені моделі та засоби досліджень передані у практику розробок нових виробів. За рахунок їх впровадження досягнуто підвищення технічних характеристик низки захисних, функціональних та силових елементів транспортних засобів спеціального призначення, зубчастих передач, технологічного оснащення, гідропередач трансмісій тощо. Зокрема, для кулькових поршнів гідрооб'ємних передач здійснено аналіз їхньої взаємодії з біговими доріжками на статорному кільці. Установлено виникнення концентрації напружень із поширенням контактної плями на перехідну частину профілю. Досліджено здатність перерозподілу контактних зусиль завдяки податливості

поверхневого шару. Запропоноване білінійне наближення пружної поведінки шару, що відображає обмеженість величини зминання. Ураховано вплив деформування статорного кільця від навантажень у вигляді додаткового вигину, що зводиться до еквівалентної зміни зазору. Досліджено вплив поверхневого шару на загальну жорсткість та точність позиціонування універсально-збірних пристосувань. На прикладі прес-форм та роликів досліджено чутливість контактної взаємодії до похибки форми тіл та їхнього відносного розташування з урахуванням поверхневого шару.

7. Здійснені розрахунково-експериментальні дослідження продемонстрували повну відповідність реальної поведінки матеріалів із мережевою структурою та контактуючих складнопрофільних тіл із проміжним шаром тій, що прогнозована на основі чисельних досліджень. Зокрема, при порівнянні результатів досліджень нетканих матеріалів, гелів, гуми, контакту м'яких тіл із мікропрофілем на поверхні, кулькового поршня гідропередачі із біговою доріжкою, універсально-збірних пристосувань, роликів та прес-форм встановлена повна відповідність тенденцій зміни контрольованих величин при варіюванні певних параметрів досліджуваних об'єктів. Так, фізико-механічні характеристики досліджених нетрадиційних матеріалів визначаються із похибкою на рівні до $10\div 12\%$. Контактний тиск у sprzęженні складнопрофільних тіл визначається із похибкою до $12\div 15\%$. Це є підтвердженням адекватності розроблених методів та моделей досліджень, а також обґрунтованості рекомендацій, здійснених на основі одержаних результатів.

8. Одержані результати дисертаційних досліджень впроваджені на низці підприємств (ДП «ЗіМ», ДП «ХКБМ», ДП «ХКБД», ПАТ «Азовмаш», ПрАТ «АзовЕлектроСталь», науково-інженерному центрі керуючої компанії «Рейлтрансхолдінг») та у практиці наукових досліджень за тематичним планом НТУ «ХП». У ході досліджень встановлено залежності технічних характеристик елементів машин, а також технологічних систем для їх виготовлення від складу та мікроструктури матеріалу в об'ємі та на поверхні. Здійснено: 1) обґрунтування складу та мікроструктури матеріалів функціональних, силових та захисних елементів машин нетрадиційної мережевої структури для виробів у складі машин військового та цивільного призначення; 2) визначення властивостей елементів технологічних систем та обґрунтування їхньої раціональної структури і проектно-технологічних параметрів за критеріями точності і жорсткості, міцності та продуктивності; 3) розробку рекомендацій із обґрунтування геометричної форми робочих поверхонь підшипників кочення, зубчастих коліс, опорних поверхонь технологічного обладнання з метою підвищення їх міцності; 4) обґрунтування способів обробки та форми профілів бігових доріжок гідрооб'ємних передач для перспективних трансмісій важких транспортних засобів спеціального призначення за критеріями міцності та інтенсифікації експлуатаційних режимів навантаження; 5) визначення шляхів підвищення міцності елементів підвіски багатовісних транспортних засобів спеціального призначення. Досягнуто: підвищення на $10\text{--}15\%$ міцності, довговічності та захисних властивостей елементів бойових машин за рахунок застосування нових нетрадиційних матеріалів, а також форми контактуючих деталей; зростання на $15\text{--}20\%$ робочих режимів та потужності системи двигун – трансмісія – рушій транспортних засобів спеціального призначення; підвищення на $30\text{--}45\%$ продуктивності роботи технологічного обладнання, точності та якості технологічних операцій при виготовленні деталей із важкооброблюваних матеріалів. Економічний ефект у сумі 2,2 млн. грн. досягнуто за рахунок зниження вартості та термінів проектних

досліджень елементів машинобудівних конструкцій, що підтверджено відповідними довідкою та актами.

Результати досліджень можуть бути застосовані та розвинені у мікромеханіці матеріалів мережевої структури та у мікромеханіці контактної взаємодії.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ткачук Н.Н. Контактное взаимодействие сложнопрофильных элементов машиностроительных конструкций с кинематически сопряженными поверхностями. Монография. Харьков: ФОП Панов А.Н., 2017. 188 с.
2. Ткачук Н.Н., Скрипченко Н.Б., Ткачук Н.А., Грабовский А.В. Контактное взаимодействие сложнопрофильных деталей машиностроительных конструкций с учетом локальной податливости поверхностного слоя. Монография. Харьков: ФОП Панов А.Н., 2017. 148 с.
3. Linder C., Miehe C., Tkachuk M. A micromechanically motivated diffusion-based transient network model and its incorporation into finite rubber viscoelasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2011. Vol. 59. Iss. 10. P.2134–2156.
4. Tkachuk M., Linder C. The maximal advance path constraint for the homogenization of materials with random network microstructure. *Philosophical Magazine*. 2012. Vol. 92. P.779–2808.
5. Tkachuk M. A Numerical Method for Axisymmetric Adhesive Contact Based on Kalker's Variational Principle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. No 3/7(93). P. 34–41.
6. Tkachuk M.M., Skripchenko N., Tkachuk M.A., Grabovskiy A. Numerical Methods for Contact Analysis of Complex-Shaped Bodies with Account for Non-Linear Interface Layers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. No 5/7(95). P. 22–31.
7. Atroshenko O., Tkachuk M., Martynenko O., Tkachuk M., Saverska M., Hrechka I., Khovansky S. The study of multicomponent loading effect on thin-walled structures with bolted connections. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. No. 1/7 (97). P. 15–25.
8. Tkachuk M. M. , Grabovskiy A., Tkachuk M. A. , Hrechka I., Ishchenko O., Domina N. Investigation of multiple contact interaction of elements of dividing stamps. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. No 4/7(100). P. 6–15.
9. Marchenko A., Kravchenko S., Tkachuk M., Tkachuk M., Saverska M. Discrete-Continual Strengthening Of Contacting Structural Elements: Mathematical And Numerical Modeling. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Proceedings of the Institute of Vehicles*. 2018. No 1(115). P. 143–153.
10. Ткачук Н.Н., Ткачук Н.А. Моделирование контактного взаимодействия плоского штампа с полупространством. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2012. № 10. С. 11–17.
11. Ткачук Н.Н., Чепурной А.Д., Скрипченко Н.Б., Литвиненко А.В., Ткачук Н.А. Расчетно-экспериментальная идентификация математических и численных моделей элементов сложных механических систем. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2014. № 2. С. 3–9.
12. Ткачук Н.Н., Мовшович И.Я., Ткачук Н.А., Скрипченко Н.Б., Литвиненко А.В.

Анализ контактного взаимодействия гладких и шероховатых тел методом граничных элементов: модели и разрешающие соотношения. 1. Постановка задачи. 2. Кинематическая модель контакта гладких тел. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2014. № 3. С. 3–10.

13. Ткачук Н.Н., Мовшович И.Я., Ткачук Н.А., Скрипченко Н.Б., Литвиненко А.В. Анализ контактного взаимодействия гладких и шероховатых тел методом граничных элементов: модели и разрешающие соотношения. 3. Прямой и вариационный методы решения задачи негерцевского нормального контакта гладких тел. 4. Модель контакта шероховатых тел. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2014. № 4. С. 3–8

14. Ткачук Н.Н., Чепурной А.Д., Скрипченко Н.Б., Литвиненко А.В., Ткачук Н.А. Многоуровневые модели в задаче анализа контактного взаимодействия сложнопрофильных тел: алгоритмы, реализация и анализ применимости. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2014. № 6. С. 10–16.

15. Ткачук Н.Н., Чепурной А.Д., Скрипченко Н.Б., Литвиненко А.В., Ткачук Н.А. Многоуровневые модели в задаче анализа контактного взаимодействия сложнопрофильных тел: алгоритмы, реализация и анализ применимости (продолжение). *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2014. № 7. С. 11–20.

16. Ткачук Н.Н., Чепурной А.Д., Скрипченко Н.Б., Литвиненко А.В., Ткачук Н.А. Многоуровневые модели в задаче анализа контактного взаимодействия сложнопрофильных тел: алгоритмы, реализация и анализ применимости (окончание). *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2014. № 8. С. 6–8.

17. Ткачук Н.Н., Ткачук А.Н. К вопросу о контактном взаимодействии плоского штампа с полупространством. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Машинознавство та САПР. Зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2010. № 19. С. 135–143.

18. Ткачук М.А., Устиненко О. В., Протасов Р. В., Ткачук М. М. До 125-річчя НТУ «ХПІ». Розвиток теоретичних основ синтезу геометрії та моделювання втомної міцності нових зубчастих зачеплень в університеті. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Проблеми механічного приводу. Зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2010. № 26. С. 3–8.

19. Ткачук М.М., Грабовский А.В., Ткачук Н.А. Подход к идентификации ударной модели для виброударной системы. *Вісник СевНТУ*. Вип. 110. Серія: Механіка, енергетика, екологія. Севастополь: СевНТУ, 2010. С. 55–60.

20. Ткачук М.М. Аналіз контактної взаємодії складнопрофільних елементів машинобудівних конструкцій з кінематично спряженими поверхнями. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Машинознавство та САПР. Зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2011. № 22. С. 123–140.

21. Грабовський А., Ткачук М., Артьомов І., Барчан Є. Підхід до ідентифікації моделі для визначення ударної сили у віброударній системі. *Машинознавство*. 2011. № 5–6. С. 21–26.

22. Ткачук М.М., Негрובה Н.Б., Ткачук М.А. Контактна взаємодія деталей машин з витягнутими контактними областями. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Проблеми механічного приводу. Зб. наук.

праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2011. № 29. С. 129–134.

23. Ткачук Н.А., Грабовський А.В., Костенко Ю.В., Артемов І.В., Ткачук Н.Н. Численне моделювання динамічних процесів в віброударних системах. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. Зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2011. № 42. С.179–187.

24. Ткачук Н.Н., Ткачук Н.А. Контакт складнопрофільних тел: зв'язана задача аналізу напружено-деформованого стану і геометричного синтезу. *Механіка та машинобудування*. 2011. № 2. С. 75–86.

25. Ткачук Н.А., Кохановська О.В., Негрובה Н.Б., Зарубина А.А., Ткачук Н.Н. Зв'язана задача аналізу напружено-деформованого стану і геометричного синтезу для контактуючих складнопрофільних тел. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Машинознавство та САПР. Зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2012. № 22. С. 121–147.

26. Ткачук Н.Н., Негрובה Н.Б., Ткачук Н.А. Особливості розподілу контактних зон і давлень при контакті тел кінцевих розмірів по поверхностям близької форми. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Проблеми механічного приводу. Зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2012. № 36. С. 166–171.

27. Костенко Ю.В., Ткачук Н.А., Грабовський А.В., Ткачук Н.Н. Численний аналіз впливу моделі для визначення сили ударного взаємодії на характер динамічних процесів в віброударних системах. *Механіка та машинобудування*. 2012. № 2. С. 34–48.

28. Ткачук Н.Н., Костенко Ю.В., Ткачук А.В., Грабовський А.В. Зміна маси одного з компонентів і його вплив на характер динамічних процесів в віброударних системах: моделі і численні результати. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Машинознавство та САПР. Зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2013. № 1(975). С. 71–85.

29. Костенко Ю.В., Ткачук Н.Н., Грабовський А.В., Ткачук Н.А. Віброударні системи: визначення періодичних режимів руху. *Вісник СевНТУ. Вип. 137/2013. Серія: Механіка, енергетика, екологія*. Севастополь, СевНТУ. 2013. С.81–85.

30. Скрипченко Н.Б., Ткачук Н.Н., Ткачук Н.А., Мухін Д.С. Аналіз контактної взаємодії гладких і шерохуватих тел методом граничних елементів. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Проблеми механічного приводу. Зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2013. № 41. С. 133–142.

31. Ткачук Н.Н., Скрипченко Н.Б., Ткачук Н.А. Контакт складнопрофільних тел: зв'язана задача аналізу напружено-деформованого стану і геометричного синтезу. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Транспортне машинобудування. Зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2014. №14 (1057). С. 155–169

32. Ткачук Н.Н., Чепурної А.Д., Литвиненко А.В., Скрипченко Н.Б., Ткачук Н.А. Контакт прямокутного в плані пуансона со скругленими кінцями з напівпространством. *Проблеми машинобудування*. 2014. Том 17. № 4. С. 17–22.

33. Ткачук Н.Н., Скрипченко Н.Б., Ткачук А.В., Головченко В.И. Модели и разрешающие соотношения для анализа контактного взаимодействия гладких и шероховатых тел методом граничных элементов. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. Зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2014. № 29(1072). С.160–173.

34. Бусяк Ю.М., Ткачук Н.Н., Васильев А.Ю., Литвиненко А.В., Мазур И.В., Даньшин Ю.А., Шаталов О.Е. Общие подходы к оценке и обеспечению защищенности бронекорпусов легких по массе машин. *Інтегровані технології та енергозбереження*. Харків, НТУ «ХПІ». 2014. № 3. С. 154–163.

35. Ткачук Н.Н., Скрипченко Н.Б., Литвиненко А.В., Ткачук А.В., Крюков С.Д., Богач А.С. Оценка влияния шероховатости на контактные давления в сопряжении сложнопрофильных тел. *Механіка та машинобудування*. 2014. № 1. С. 29–35.

36. Скрипченко Н.Б., Ткачук А.В., Ткачук Н.Н., Касай Е.И., Крылюк Б.И. Влияние формы беговой дорожки на контактное взаимодействие с шаровыми поршнями радиальной гидropередачи. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. Зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2015. № 31 (1140). С. 81–100.

37. Скрипченко Н.Б., Ткачук Н.Н., Атрошенко А.А., Ткачук Н.А. Экспериментальное исследование контактного взаимодействия сложнопрофильных шероховатых тел с учетом податливости. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: *Проблеми механічного приводу*. Зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2015. № 34 (1143). С. 124–129.

38. Ткачук Н.Н., Скрипченко Н.Б., Ткачук Н.А., Неделько К. Д. Влияние податливости шероховатого слоя на распределение контактных давлений в сопряжении сложнопрофильных тел. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: *Транспортне машинобудування*. Зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2015. № 43(1152). С. 132–139.

39. Ткачук Н.Н., Скрипченко Н.Б. Контактное взаимодействие в модифицированном зубчатом зацеплении. *Механіка та машинобудування*. 2015. № 1. С. 113–117.

40. Скрипченко Н.Б., Ткачук Н.Н., Атрошенко А.А. Расчетно-экспериментальное исследование контакта сложнопрофильных тел. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. Зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2016. №12 (1184). С. 84–88.

41. Грабовський А.В., Васильев А.Ю., Ткачук М.М., Танченко А.Ю., Мартиненко О.В. та інші. Забезпечення тактико-технічних характеристик військових гусеничних і колісних машин на етапі проектних досліджень. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. Зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2016. №18 (1190). С. 22–29.

42. Скрипченко Н.Б., Ткачук М.М., Неділько К. Д., Киричук Д.В., Борисенко С.В., Касай О.І. Контактна взаємодія складнопрофільних деталей з урахуванням локальної податливості поверхневого шару. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. Зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2016. №39 (1211). С. 93–101.

43. Ткачук Н.Н., Скрипченко Н.Б., Ткачук Н.А. Решение задач о контактном взаи-

- модействии шероховатых тел с применением модели нелинейного винклеровского слоя. *Механіка та машинобудування*. 2016. № 1. С. 3–14.
44. Ищенко О. А., Демина Н. А., Ткачук Н.Н., Скрипченко Н.Б., Грабовський А.В. и др. Компьютерное моделирование контактного взаимодействия элементов штамповой оснастки. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Транспортне машинобудування. Зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2017. № 5(1227). С. 108–134.
45. Ткачук М.М., Грабовський А.В., Ткачук М.А., Саверська М.С. Розрахунково-експериментальне дослідження впливу профілю і жорсткості проміжного шару на розподіл контактного тиску між складнопрофільними тілами. *Механіка та машинобудування*. 2019. №1. С. 36–50.
46. Ткачук М.М. Теоретичні основи забезпечення високих технічних характеристик машин військового та цивільного призначення на основі дослідження міцності складнопрофільних деталей. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Машинознавство та САПР. Зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2017. № 12(1234). С. 86–95.
47. Ткачук Н.А., Ищенко О. А., Ткачук Н.Н., Атрошенко А. А. Расчетно-экспериментальное исследование элементов штамповой оснастки. *Научный Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии*. Краматорск, 2017. № 3 (24Е). С. 11–19.
48. Ищенко О.А., Ткачук М.А., Грабовський А.В., Ткачук М.М., Скрипченко Н.Б., Мерецька К.О. Контактна взаємодія елементів розділових штампів: моделі, закономірності, критерії проектних рішень. *Механіка та машинобудування*. 2018. № 1. С. 48–59.
49. Ткачук М.М. Базові підходи при дослідженні реакції волоконних матеріалів на зовнішнє навантаження. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Машинознавство та САПР. Зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2018. № 7 (1283). С. 132–141.
50. Ткачук М. М., Грабовський А. В., Бондаренко М. О., Саверська М. С., Ткачук М. А., Тесля Д. О. Розрахунково-експериментальне дослідження контактної взаємодії елементів універсально-збірних пристосувань. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Машинознавство та САПР. Зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2019. № 1. С. 81–92
51. Ткачук Н.Н. Анализ реакции волоконных материалов на действие нагрузок на основе микромеханических моделей. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Машинознавство та САПР. Зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2018. № 25 (1301). С. 149–155.
52. Ткачук Н.Н., Скрипченко Н.Б., Грабовский А. В., Саверская М. С., Ткачук Н. А., Зарубина А. А., Сериков В. И., Мерецкая К. А. Расчетно-экспериментальное исследование элементов механических систем. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Транспортне машинобудування. Зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2018. № 29 (1305). С. 129–156.
53. Ткачук Н.Н., Львов Г.И., Грабовский А.В., Скрипченко Н.Б. Контактное взаимодействие элементов машин с нелинейно упругим промежуточным слоем. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*.

- Харків, НТУ «ХПІ». *Серія: Динаміка і міцність машин. Зб. наук. праць.* 2018. № 33 (1309). С. 43–63.
54. Ткачук М. А., Іщенко О. А., Дьоміна Н. А., Ткачук М. М., Грабовський А. В., Шеманська В. В., Васильченко Д. Р. Контактна взаємодія елементів штампового оснащення. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».* *Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії.* Зб. наук. праць. Харків: НТУ «ХПІ». 2018. № 41 (1317). С. 67–76.
55. Ткачук М.М. Метод пружної гомогенізації бімодальних мереж. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».* *Серія: Машинознавство та САПР.* Зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ». 2019. № 7 (1332). С. 107–113.
56. Tkachuk M., Linder C. A micromechanically based model for viscoelasticity of rubbery polymers. *10th GAMM Seminar on Microstructures.* TU Darmstadt, Germany. 2011. P. 46.
57. Tkachuk M., Linder C. Microstructural driven Computational Modeling of Polymers. *SimTech 2011. International Conference on Simulation Technology. Book of abstracts: Advanced Mechanics of Multi-Scale and Multi-Field Problems.* 2011. University of Stuttgart . P. 26.
58. Tkachuk M., Linder C. Microstructural driven computational modeling of polymers. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics.* 2011. Vol. 11. P. 557–558.
59. Tkachuk M., Linder C. A micromechanically motivated diffusion-based transient network model and its incorporation into finite rubber viscoelasticity. *COMPLAS XI. International conference on computational plasticity.* 2011. Barcelona, Spain.
60. Tkachuk M., Linder C. The maximal advance path constraint for the homogenization of materials with random network microstructures. *11th GAMM seminar on microstructures.* 2012. University of Duisburg-Essen, Germany. P. 46.
61. Tkachuk M., Linder C. The maximal advance path constraint for the homogenization of materials with random network microstructures. *GAMM 2012. 83nd annual meeting of the international association of applied mathematics and mechanics.* 2012. TU Darmstadt, Germany. P. 198–199.
62. Tkachuk M., Linder C. Homogenization of random elastic networks with non-affine kinematics. *Proceedings in applied mathematics and mechanics.* 2012. Vol. 12. P. 417–418.
63. Tkachuk M., Linder C. Dynamic relaxation with local artificial modes for the analysis of floppy fiber networks. *PACAM XIII-6172. The pan american congress of applied mechanics.* 2013. Houston, USA. Section 8-4. Biomembranes and tissues.
64. Kostenko Yu., Tkachuk M., Grabovsky A., Tkachuk M.A. Subharmonic modes in vibroimpact systems. *The Fourth International Conference «Nonlinear Dynamics–2013».* *Proceedings.* 2013. Sevastopol (Ukraine). Pp. 83–86.
65. Kostenko Y.V., Artemov I.V., Tkachuk N.N. Sybharmonical modes in vibroimpact systems. *Международный научно-исследовательский журнал: Сборник по результатам XXV заочной научн. конф. Research Journal of International Studies.* Екатеринбург: МНИЖ. 2014. № 3, часть 2. С. 27–30.
66. Tkachuk M., M. Ganser, Linder C. Inelastic deformation of nonwoven textiles due to the frictional sliding of bonded fibers. *WCCM XI. 11th. World Congress on Computational Mechanics.* 2014, Barcelona, Spain.
67. Tkachuk M.A., Skripchenko N., Grabovskiy A., Tkachuk M.M. Numerical tools for analysis of complex-shaped bodies in mechanical contact. *Зб. «Book of Proceedings of the 56th International Conference of Machine Design Departments (ICMD 2015)».* P. 393–398.
68. Tkachuk M.M., Kostenko Yu., Grabovsky A., Tkachuk M. A. Parameter analysis of

vibro-impact machines dynamics with variable mass and stiffness. *Nonlinear Dynamics–2016: Proceedings of 5th International Conference*. Kharkov, NTU «KhPI», 2016. P. 238–244.

69. Tkachuk M. Numerical model for contact with adhesion based on Kalker's variational principle. *7th GACM Colloquium on Computational Mechanics for Young Scientists from Academia and Industry, Stuttgart, 2017*. P. 190–193.

70. Головченко В., Ткачук М., Шеремет В. Числове моделювання контактної взаємодії елементів машинобудівних конструкцій. *Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: тези доповідей 2-й міжнар. наук.-практ. конф.*. Львів, 2010. С. 41–42.

71. Ткачук М.М., Сердюк Ю.Б., Ткачук А.М. Контактна взаємодія плоского штампа з обмеженням з урахуванням жорсткості поверхневого шару. *10-й міжнар. симпозіум україн. інженерів механіків у Львові: Праці*. Львів, КІНПАТРИ ЛТД, 2011. С. 176–177.

72. Ткачук А.М., Ткачук М.М. Взаємодія плоского штампу з напівпростором: моделі та результати. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XIX міжнар. наук.-практ. конф., Ч. 1* Харків, НТУ «ХПІ», 2011. С. 200.

73. Ткачук М.М., Ткачук М.А., Ткачук А.М. Зв'язана задача геометричного синтезу та аналізу напружено-деформованого стану складнопрофільних тіл з урахуванням контакту. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XX міжнар. наук.-практ. конф., Ч. 1*. Харків, НТУ «ХПІ», 2012. С. 220.

74. Скрипченко Н., Ткачук М. Варіант методу граничних елементів для аналізу контактної взаємодії гладких і шорстких тіл. *11-й міжнародний симпозіум українських інженерів механіків у Львові: Тези доповідей*. Львів, КІНПАТРИ ЛТД, 2013. С. 84–85.

75. Бондаренко М.А., Бондаренко О.А., Скрипченко Н.Б., Ткачук Н.Н., Кохановський В.И. Контакт сложнопрофильных тел: теория, методы и алгоритмы. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXI міжнар. наук.-практ. конф., Ч. 1*. Харків, НТУ «ХПІ», 2013. С. 182.

76. Костенко Ю.В., Ткачук Н.А., Грабовський А.В., Ткачук Н.Н. Численное определение влияния вида силы ударного взаимодействия на характер динамических процессов в виброударных системах. *Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-25: сб. трудов XXV Междунар. научн. конф. в 10 т. Т. 9. Секции 3, 5, 7, 10 / под общ. ред. А.А. Большакова*. Волгоград: Волгогр. гос. техн. ун-т; Харьков, НТУ «ХПІ», 2012. С. 94–98.

77. Литвиненко О., Ткачук М., Грабовський А. Проектно-технологічне забезпечення захищеності бронекорпусів легкоброньованих машин від дії динамічних навантажень. *Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: Тези доповідей*. Львів, КІНПАТРИ ЛТД, 2012. С. 122–123.

78. Литвиненко О.В., Ткачук М.М., Скрипченко Н.Б., Кохановська О.В., Веретельник О.В. Контактна взаємодія індентора з перешкодою. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ. Тези доповідей міжнар.наук.-техн.конф.*. Львів, Друкарня АСВ ім. гетьмана П. Сагайдачного, 2014. С. 53–54.

79. Ткачук Н.Н., Скрипченко Н.Б., Ткачук Н.А., Бондаренко Л.Н. Влияние свойств шероховатого слоя на контакт сложнопрофильных упругих тел. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXII міжнар. наук.-практ. конф., Ч. 1*. Харків, НТУ «ХПІ», 2014. С. 235.

80. Ткачук М., Литвиненко О., Грабовський А. Обґрунтування проектно-технологічних рішень для забезпечення тактико-технічних характеристик легкоброньованих машин.

ваних машин. *Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: Тези доповідей 4-й міжнар. наук.-техн. конф..* Львів, 2014. С. 7–8.

81. Литвиненко О.В., Ткачук М.М., Танченко А.Ю., Васильєв А.Ю., Мартиненко О.В. Проектно-технологічне забезпечення міцності бронекорпусів. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ: Тези доповідей міжнар.наук.-техн.конф..* Львів, АСВ, 2015. С. 41–42.

82. Ткачук М.М., Скріпченко Н.Б., Саверська М.С., Середа А.В., Дзюба Ю.С., Іщенко О.А. Контакт складнопрофільних тіл: підходи, моделі, методи. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIII міжнар. наук.-практ. конф., Ч. 1.* Харків, НТУ «ХПІ», 2015. С. 229.

83. Ткачук М.М. Мікромеханіка нетканних матеріалів. *12-й міжнар.симпозіум україн. інженерів механіків у Львові: Тез. доп.* Львів, КІНПАТРІ ЛТД, 2015. С. 25–26.

84. Васильєв А.Ю., Ткачук М.М., Танченко А.Ю., Мартиненко О.В. Методи забезпечення тактико-технічних характеристик військових гусеничних і колісних машин на етапі проектних досліджень. *Перспективи науково-технологічного забезпечення оборонно-промислового комплексу України: Інформаційно-комунікативний захід.* Київ, ТОВ «Міжнародний виставковий центр», 2015. С. 234–238.

85. Іщенко О.А., Ткачук А.В., Грабовський А.В., Ткачук Н.Н., Демина Н.А. Расчет базовых плит разделительных штампов. *Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии: Тези доповідей VII міжнар. наук.-техн. конф..* Харків, 2015. С. 25–28.

86. Ткачук М.А., Грабовський А.В., Ткачук М.М., Васильєв А.Ю., Мазур І.В. Проблеми забезпечення міцності елементів бойових броньованих машин: теорія, методи та моделі. *Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки. Тези доповідей VI наук.-техн.конф...* Київ, Видавничий дім Дмитра Бураго, 2015. С. 186–187.

87. Васильєв А.Ю., Шаталов О.Є., Ткачук М.М., Дудар Є.Є., Литвиненко О.В. Методи забезпечення тактико-технічних характеристик військових гусеничних і колісних машин на етапі проектних досліджень. *Наукове забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України: Тези доповідей VII наук.-практ. конф.. Секція № 2.* Харків, Національна академія Національної гвардії України, 2016. С. 27–29.

88. Скрипченко Н.Б., Ткачук Н.Н., Бондаренко Л.Н., Неделько Е.Д., Киричук Д.В., Борисенко С.В. Исследование контактного взаимодействия в модифицированном зубчатом зацеплении: модели. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIV міжнар. наук.-практ. конф., Ч. 1.* Харків, НТУ «ХПІ», 2016. С. 226.

89. Ткачук М.М., Скріпченко Н.Б., Бусяк Ю.М., Вакуленко В.В., Магераров Л.К.-А. Моделювання контактної взаємодії індентора з перешкодою методами скінченних і граничних елементів. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ: Тези доповідей міжнар. наук.-техн. конф..* Львів, НАСВ, 2016. С. 59.

90. Васильєв А. Ю., Танченко А. Ю., Ткачук М. М., Скріпченко Н. Б., Лісовол Я. М. Обґрунтування структури та параметрів бронекорпусів легкоброньованих машин за критеріями захищеності. *Наука: безпека країни та розвиток військово-промислового комплексу: Інформаційно-комунікативний захід / відп. ред. В.С.Шовкалюк.* Київ, ТОВ «Міжнародний виставковий центр», 2016. С. 32–36.

91. Ткачук М.А., Грабовський А., Ткачук М.М., Васильєв А. Комп'ютерне моделю-

вання як основа проектно-технологічних рішень для елементів бойових броньованих машин. *Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: Матеріали конференції*. Львів, КІНПАТРИ ЛТД, 2016. С. 12–14.

92. Ищенко О.А., Ткачук Н.Н., Кротенко Г.А., Ткачук Н.А. Компьютерное моделирование контактного взаимодействия элементов штамповой оснастки с применением параметрических моделей. *Ресурсозбереження та енергоефективність процесів та об'єднання обробки тиском у машинобудуванні і металургії: Матеріали міжнар. наук.-техн. конф.*. Харків, НТУ «ХПІ», 2016. С. 27–30.

93. Ткачук Н.Н., Скрипченко Н. Б. Контактное взаимодействие сложнопрофильных деталей машин: модели, методы, закономерности. *Механіка машин – основна складова прикладної механіки: Матеріали Всеукраїнської наук.-техн. конф.*. Дніпро, НМетАУ, 2017. С. 228–231.

94. Скрипченко Н. Б., Ткачук Н.Н., Атрошенко А. А., Ляшенко А. С., Хузяхметова М. Р., Погребняк Д. А., Головин А. М. Расчетно-экспериментальные исследования контакта сложнопрофильных тел: методология. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXV міжнар. наук.-практ. конф. у 4 ч. Ч. I*. Харків, НТУ «ХПІ», 2017. С. 222.

95. Грабовський А.В., Ткачук М.М., Танченко А.Ю., Мартиненко О.В., Луньов Є.О. Забезпечення тактико-технічних характеристик військових гусеничних та колісних машин на основі комп'ютерного моделювання фізико-механічних процесів і станів. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ: Тези доповідей міжнар. наук.-техн. конф...* Львів, НАСВ, 2017. С. 26–27.

96. Ткачук М., Скрипченко Н., Бондаренко М., Набоков А. Контактна взаємодія складнопрофільних тіл: моделі, методи, закономірності. *13-й міжнародний симпозіум українських інженерів механіків у Львові: Матеріали симпозіуму*. Львів, КІНПАТРИ ЛТД, 2017. С. 52–54.

97. Ткачук М.М., Скрипченко Н.Б., Саверська М.С., Веретельник О.В., Набоков А.В. Аналіз контактної взаємодії складнопрофільних елементів машинобудівних конструкцій з кінематично спряженими поверхнями. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: Тези доповідей V міжнар. наук.-практ. конф.*. Київ, ДНУ УкрІНТЕІ, 2017. С. 201.

98. Ткачук М.М., Скрипченко Н. Б., Саверська М. С., Бондаренко М. О., Зарубіна А. О., Кохановська О. В., Храмцова І. Я., Бондаренко Л. М. Формування єдиної розв'язувальної системи співвідношень для аналізу контактної взаємодії складнопрофільних тіл за наявності між ними нелінійно пружного шару. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXVI міжнар. наук.-практ. конф. у 4 ч. Ч. I*. Харків, НТУ «ХПІ», 2018. С. 201.

99. Ткачук М.М., Скрипченко Н. Б., Грабовський А. В., Головин А. М., Ляшенко А.С. Теоретичні моделі для аналізу властивостей волоконних матеріалів у складі елементів озброєння та військової техніки. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ: Тези доповідей міжнар. наук.-техн. конф.* Львів, НАСВ, 2018. С. 67–68.

100. Ткачук М., Танченко А., Грабовський А., Ткачук-мол. М. Методи визначення усталених режимів руху віброударних систем. *Віб्राції в техніці та технологіях: Тези доповідей XVII міжнар. наук.-техн. конф.* Львів, НУ «Львівська політехніка», 2018.

С. 25–26.

101. Ткачук М.А., Брагіна Л. Л., Ткачук М.М., Воронов Г.К. Обґрунтування конструктивних і технологічних параметрів бронекорпусів легкоброньованих машин. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: Тези доповідей VI міжнар. наук.-практ. конф.*. Київ, ДНУ УкрІНТЕІ, 2018. С. 149–150.

102. Ткачук-мол. М., Грабовський А., Ткачук М. Спеціалізовані програмно-модельні комплекси для аналізу деформування волоконних матеріалів та контактної взаємодії складнопрофільних тіл на основі мікро-макромеханічних моделей. *Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: Матеріали 6-ї міжнар. наук.-техн. конф.* Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2018. С. 19–21.

103. Ткачук Н.А., Ищенко О.А., Демина Н.А., Ткачук Н.Н., Грабовский А.В., Шеманская В.В., Васильченко Д.Р. Компьютерное моделирование контактного взаимодействия элементов штамповой оснастки с применением параметрических моделей. *Ресурсозбереження та енергоефективність процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні і металургії: Матеріали X міжнар. наук.-техн. конф.* Харків, НТУ «ХПІ», 2018. С. 109–110.

104. Мартиняк Р., Ткачук М. А., Слободян Б., Ткачук М.М., Маланчук Н. Локальне зношування тіл з регулярним рельєфом. *Сучасні проблеми механіки та математики: збірник наукових праць у 3-х т. / за заг. ред. А.М. Самойленка та Р.М. Кушніра* [Електронний ресурс]. Львів, Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, 2018. Т. 2. С. 59–60.

105. Ткачук М.М., Хлань О.В., Заворотній А.В., Малакей А.М., Шуть О.Ю., Набоков А.В., Рікунов О.М. Проектно-технологічне забезпечення міцності елементів бойових броньованих машин. *Збірник тез доповідей наук.-практ. конф. «Службово-бойова діяльність Національної гвардії України: сучасний стан, проблеми та перспективи. Секція 2 Технічне та тилове забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України: сучасний стан, проблеми та перспективи. Національна академія Національної гвардії України.* Харків, 2019. С. 170.

106. Грабовський А.В., Ткачук М.М., Скріпченко Н.Б., Мухін Д.С., Ткачук М.А., Саверська М.С. Методи аналізу напружено-деформованого стану, контактної взаємодії та синтезу форми складнопрофільних тіл на основі фізично і структурно нелінійних моделей. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXVII міжнар. наук.-практ. конф. у 4 ч. Ч. IV.* Харків: НТУ «ХПІ». 2019. С. 330.

107. Ткачук М.А., Грабовський А.В., Ткачук М.М., Васильєв А.В., Хлань О.В. Забезпечення тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин на проектно-технологічних етапах. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ: Зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн.конф.* Львів: НАСВ, 2019. С. 9.

108. Ткачук-мол. М., Грабовський А., Ткачук М. Мікромеханічні моделі для дослідження напружено-деформованого стану елементів конструкцій. *14-й міжнародний симпозіум українських інженерів механіків у Львові: Матеріали симпозіуму.* Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2019. С. 17–18.

АНОТАЦІЯ

Ткачук М.М. Мікромеханічні моделі та методи осереднення властивостей матеріалів мережевої структури та проміжних шарів контактуючих тіл.– На правах ру-

копису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла. – Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, Харків, 2019.

У роботі міститься вирішення актуальної наукової проблеми механіки деформівного твердого тіла. Ця проблема 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. На основі розроблених удосконалених підходів мікромеханіки просторових мережевих систем одновимірних елементів розроблені моделі деформування нових нетрадиційних матеріалів, а також методи розв'язання системи розв'язувальних співвідношень. Запропоновано концепцію шляхів максимального просування, за допомогою якої було здійснено обґрунтоване поєднання мікро- та макрокінематики. Сформульовано варіаційний принцип мінімуму осередненої енергії для визначення рівноваги мікромереж та відгуку матеріалу.

Розроблені методи і моделі для дослідження контактної взаємодії складнопрофільних тіл із урахуванням мікромеханічних властивостей поверхневих і проміжних шарів, які визначають їхню локальну контактну нелінійну жорсткість. У результаті одержано структурно-фізично нелінійні співвідношення. Для їх розв'язання розроблено методи додаткових зазорів та змінних параметрів податливості. Установлені якісно нові закономірності впливу на розподіл контактного тиску профілю контактуючих тіл та властивостей проміжного шару.

Із застосуванням створених методів, моделей та засобів досліджень розв'язано низку модельних та прикладних задач.

Ключові слова: механіка деформівного твердого тіла, матеріал із мережевою структурою, гомогенізація, шлях максимального просування, нетканий матеріал, складнопрофільне тіло, метод додаткових зазорів, контактна взаємодія, контактний тиск, проміжний шар

АННОТАЦИЯ

Ткачук Н.Н. Микромеханические модели и методы осреднения свойств материалов сетевой структуры и промежуточных слоев контактирующих тел. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела. – Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, 2019.

В работе содержится решение актуальной научной проблемы механики деформируемого твердого тела. Эта проблема заключается в создании теоретических основ микромеханики деформирования новых материалов сетевой пространственно-волоконной структуры и механики контактного взаимодействия упругих тел с учетом микромеханических моделей шероховатости и других промежуточных или поверхностных слоев.

На основе разработанных усовершенствованных подходов микромеханики пространственных сетевых систем одномерных элементов разработаны модели деформирования новых нетрадиционных материалов, а также методы решения системы разрешающих соотношений. Предложена концепция путей максимального продвижения, с помощью которой было осуществлено обоснование сочетания микро- и макрокінемати-

ки. Сформирован вариационный принцип минимума усредненной энергии для определения равновесия микросети и отклика материала.

Разработанные методы и модели для исследования контактного взаимодействия сложнопрофильных тел с учетом микромеханических свойств поверхностных и промежуточных слоев, которые определяют их локальную контактную нелинейную жесткость. В результате получены структурно-физически нелинейные соотношения. Для их решения разработаны методы дополнительных зазоров и переменных параметров податливости. Установлены качественно новые закономерности влияния профиля контактирующих тел и свойств промежуточного слоя на распределение контактного давления.

С применением созданных методов, моделей и средств исследований решен ряд модельных и прикладных задач.

Ключевые слова: механика деформируемого твердого тела, материал с сетевой структурой, гомогенизация, путь максимального продвижения, нетканый материал, сложнопрофильное тело, метод дополнительных зазоров, контактное взаимодействие, контактное давление, промежуточный слой

ABSTRACT

Tkachuk M.M. Micromechanical models and averaging methods for properties of materials with network microstructure and interface layers between contacting bodies. – Manuscript.

Thesis for Doctor of technical sciences degree in speciality 01.02.04 – Mechanics of Deformable Solids. – Podgorny Institute for mechanical engineering problems of NAS of Ukraine, Kharkiv, 2019.

The work delivers solution to a relevant scientific problem of solid mechanics. It consists in developing theoretical basis of micromechanics of new materials with spatial fiber network microstructure that undergoes deformations and contact interaction of elastic bodies with account for micromechanical models of roughness and other intermediate or surface layers.

A unified approach has been developed to solve the formulated problems. It connects micro- and macroscale models of material deformation for network microstructures in the bulk of a solid and contact interaction of bodies with rough or microstructurally modified surfaces and intermediate layers. The mathematical formulation is derived in a form of variational principles that lead to a well-posed problems of nonlinear optimization.

The advanced approach to the micromechanics of spatial network structures of elongated one-dimensional elements have been used to develop novel material models. The corresponding numerical methods have been proposed to solve the obtained systems of equations. The new micromechanical approach to the elastic homogenization of permanently bonded networks accounts initial orientation of the fibers and introduces a vectorial variable for the microstretch. It distinguishes this model from the rest of the alternative theories that are based on a simplified representation of the network. A totally new concept of maximal advance paths have been proposed. This have led to a well-justified kinematical relation between micro- and macrodeformations. The obtained equation restricts kinematically admissible rotations and elongations of the fibers to the actual macroscopic deformation gradient. The variational principle of minimum averaged energy forms the equilibrium conditions for the network response and the homogenized response of the material. A fundamentally new mechanism of irreversible deformations and failure was introduced for the discrete models of nonwoven

materials. It models the relative sliding of connected fibers and their consequent pull-out.

New methods and models have been developed for the analysis of contact interaction of complex-shaped bodies with account for the micromechanical properties of surface and intermediate layers characterized by nonlinear local contact stiffness. A set of structurally and physically nonlinear relations have been derived. A weak problem statement has been formulated as a minimum principle for the complementary energy in terms of the variable contact pressure distribution. The problem has been discretized by means of a boundary element approximation. The derived set of algebraic equations and inequalities is solved by the newly developed methods of auxiliary gap and variable compliance. The effect of the geometrical shape and intermediate layer properties on the distribution of the contact pressure have been studied for representative cases. As a result qualitatively new regularities have been discovered.

An inverse problem statement has been derived for the justification of the contact geometry. A correction of geometry profile by specially adjusted additional external loads has been proposed in order to achieve the desired distribution of the contact pressure.

The developed methods and models as well as the numerical analysis tools have been applied to a series of model and applied problems. The deformation behaviour of novel materials with network microstructures of one-dimensional elements has been determined. Macroscopical properties of these materials have been evaluated based on the special microscopic models and the homogenization methods. Regularities in contact distribution and its dependence on geometrical and physical factors have been determined for various complex-shaped bodies. New design solutions for machine elements that improve their strength and durability have been justified. The developed methods and analysis tools have been introduced into the design of new engineering products. Their implementation resulted in improved technical characteristics of protection, structural and functional elements of transport vehicles of special purpose, gear transmissions, technical equipment, hydrovolumetric drives and so on.

The conducted computational and experimental studies showed good agreement with the real response of network materials and the observed behavior of interacting elastic bodies with intermediate contact layer.

Two major scientific fields have been established: micro-macro mechanics of materials with random network microstructures composed of one-dimensional elements of enthalpic and entropic response; structurally and physically nonlinear problems of contact interaction of complex-shaped bodies with nonlinear intermediate layer.

Keywords: solid mechanics, materials with network microstructures, homogenization, maximal advance path, nonwoven material, complex-shaped body, auxiliary gap method, contact interaction, contact pressure, intermediate layer



Відповідальний за випуск О.О. Стрельнікова

Підписано до друку 24.01.2020 р.

Формат 60x84/16. Папір офсетний. Друк цифровий.

Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 1,8.

Наклад 120 прим. Зам. № 332

Віддруковано в ТОВ «ДРУКАРНЯ МАДРИД»

61024, м. Харків, вул. Гуданова, 18

Тел.: (057) 756-53-25

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

Серія ДК, № 4399 от 27.08.2012 р.

www.madrid.in.ua e-mail: info@madrid.in.ua